

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



MODELAÇÃO DE CONSUMOS E PERDAS DE ÁGUA EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO

Raúl Galiana Talens

VERSÃO DE TRABALHO

**Dissertação realizada no âmbito do
Mestrado Integrado em Engenharia Civil**

**Orientador: Manuel Maria Pacheco Figueiredo (Professor Auxiliar da Faculdade
de Engenharia da Universidade do Porto)
Co-orientador: Daniel Aguado García (Professor Titular da UPV)**

Outubro 2022

© Raúl Galiana Talens, 2022

Resumo

A presente dissertação teve como objetivo principal a modelar e calibração uma rede de distribuição de água potável como instrumento para a minimização das perdas reais de água.

Hoje em dia, em quase todos os campos de atuação, temos à nossa disposição uma grande quantidade de recursos físicos, tecnológicos e de outros tipos para procurar a excelência operativa. No entanto, na área do abastecimento de água, continuam a observar-se ineficiências, por exemplo quando comparamos os volumes de água faturada face aos volumes entrados nos sistemas. Em particular, a redução dos níveis de perdas reais de água permite o aumento da eficiência das redes de distribuição.

Assim, este trabalho tem a intenção de não só tratar a calibração das redes, mas também apresentar os antecedentes ao recurso a esta solução, i.e., os motivos pelos quais é proposta e o processo a seguir na modelação e calibração das perdas reais. Para isto, fez-se uma análise geral da situação no mundo e, especialmente, em Portugal no que respeita aos recursos hídricos e, concretamente, ao abastecimento de água potável. Com o suporte do simulador hidráulico Epanet, foi realizada a modelação e calibração das perdas de água num exemplo dado, com recurso a um processo iterativo, primeiro de forma manual e, depois, se poderia fazer isto com auxílio de um programa de cálculo escrito em Matlab.

As aplicações informáticas usadas nesta tese foram desenvolvidas em Microsoft Excel e EPANET.

Abstract

The present dissertation had as main objective the modelling and calibration of a drinking water distribution network as an instrument for the minimization of real water losses.

Nowadays, in almost every field of action, we have at our disposal a large amount of physical, technological, and other resources to pursue operative excellence. However, in the area of water supply, inefficiencies continue to be observed, for example when we compare the volumes of water billed against the volumes entering the systems. In particular, the reduction of the levels of real water losses allows an increase in the efficiency of distribution networks.

Thus, this work intends not only to deal with the calibration of networks but also to present the background to the use of this solution, i.e., the reasons why it is proposed and the process to follow in the modelling and calibration of real losses. For this, it was made a general analysis of the situation in the world and, especially, in Portugal regarding water resources and, specifically, drinking water supply. With the support of the EPANET hydraulic simulator, the modelling and calibration of water losses were performed in a given example, using an iterative process, first manually and then with the help of a calculation program written in Matlab.

The computer applications used in this thesis were developed in Microsoft Excel, EPANET and Matlab.

Agradecimentos

Primeiro de tudo, agradecer ao professor Manuel Maria Pacheco Figueiredo pela oportunidade dada e por acreditar em mim para este trabalho e aos professores da UPV: Daniel Aguado, por estar a minha disposição para qualquer dúvida e o coordenador de mobilidade Juan Bautista Marco. Também agradecer aos responsáveis de mobilidade da Universidade do Porto pela sua ajuda e por dar-me esta oportunidade.

Finalmente, agradecer à minha família pelo apoio incondicional, ajudar-se sempre que tenho necessitado e fazer possível que terminei os meus estudos em Engenharia Civil.

Índice

Resumo	iii
Abstract.....	v
Agradecimentos	vii
Índice.....	ix
Lista de figuras	xi
Lista de tabelas	xiii
Abreviaturas	xiv
Capítulo 1	1
Introdução	1
1.1 - Objetivos.....	1
1.2 - Metodologia de trabalho	2
Capítulo 2	3
Contexto e enquadramento	3
2.1- Recursos.....	3
2.2- Economia.....	5
6	
2.3- Caso de Portugal	8
9	
2.4- Necessidade de adotar medidas	11
12	
Capítulo 3	13
Balanço hídrico e perdas de água	13
3.1- Balanço hídrico.....	13
3.2- Perdas de água	19
Capítulo 4.....	29
Métodos e ferramentas	29
4.1- EPANET	29
4.2- Microsoft Excel	36
4.3- MATLAB.....	36
Capítulo 5.....	38
Modelação e calibração de rede	38
5.1- Obtenção dos dados de partida	38
5.2- Conceitos teóricos e metodologia de trabalho	50
5.3- Aplicação da metodologia ao caso de estudo	55
Capítulo 6	67

Conclusões	67
Referências	68

Lista de figuras

Figura 1. Risco de ter seca nos próximos anos por países [2]	4
Figura 2. Intensidade da seca em Portugal (abril 2022) [3]	5
Figura 3. Preços da água abastecida em vivendas do mundo por cidades.....	6
Figura 4. Qualidade da água vs Salário medio.....	7
Figura 5. Qualidade da água vs Preço [4]	8
Figura 6. Clima em Lisboa durante 2021	9
Figura 7. Estrutura dos consumos domésticos	10
Figura 8. Objetivos Desenvolvimento Sustentável	12
Figura 9. Balanço hídrico	13
Figura 10. Redução ANF respeito AF	14
Figura 11. Percentagem ANF em Portugal	15
Figura 12. ANF mundialmente	17
Figura 13. Medidas para reduzir a ANF	18
Figura 14. Perdas típicas numa rede de abastecimento	19
Figura 15. Exemplo geral de áreas de medição numa rede [11]	21
Figura 16. Perdas reais em Portugal	23
Figura 17. Percentagem de ANF respeito a AES nos sistemas em baixa	25
Figura 18. Perdas acumuladas no tempo	26
Figura 19. Duração de fugas e volume de perdas	27
Figura 20. Pressão - Consumo - Perdas	27
Figura 21. Exemplo de rede em EPANET [18].....	30
Figura 22. Parte dum modelo de rede em EPANET [18].....	31
Figura 23. Albufeira de Atazar em Madrid (Espanha) [1]	32
Figura 24. Reservatório de Nível Fixo (reservoir) do modelo EPANET [18]	32
Figura 25. Tubo PEAD PE100 [20]	33
Figura 26. Exemplo de união de tubos num nó de EPANET	33

Figura 27. Acessório T para união de 3 tubos [20]	34
Figura 28. Nó (junction) do modelo EPANET	34
Figura 29.Exemplo de válvula borboleta (a simular por uma Throttle Control Valve) [20]	35
Figura 30. Válvula redutora de pressão (Pressure Reducing Valve) no EPANET	35
Figura 31. Logo MATLAB.....	36
Figura 32, Modelo EPANET da rede de abastecimento a estudar.....	39
Figura 33. Lei de vazão do nó i	51
Figura 34. Coeficiente de vazão do nó i	51
Figura 35. Coeficiente de vazão global da rede	52
Figura 36. Coeficiente de vazão global da rede	52
Figura 37. Caudal total de perdas	53
Figura 38. Início do processo iterativo	53
Figura 39. Altura piezométrica média ponderada	54
Figura 40. Coeficiente de perdas unitário para a iteração "k"	54
Figura 41. Fim do processo iterativo por convergência de caudais	54
Figura 42. Quantificação expedita dos cpp's	55
Figura 43. Caudal doméstico médio noturno mínimo	56
Figura 44. Inserção do coeficiente de vazão no nó emissor n1	62
Figura 45. Fatores horários domésticos (EPANET)	65
Figura 46. Caudais médios horários decompostos	66

Lista de tabelas

Tabela 1. Níveis de seca.....	5
Tabela 2. Água distribuída pela rede pública em Portugal [10]	10
Tabela 3. Caudais médios horários fornecidos à rede.....	40
Tabela 4. Consumos dos nós na rede	45
Tabela 5. Diâmetros das condutas	49
Tabela 6. Caudal de perdas máximo.....	56
Tabela 7. Resultados dos cpp's	57
Tabela 8. Obtenção do $L_{pond\ total}$	62
Tabela 9. Controlo do processo iterativo (primeira iteração)	63
Tabela 10. Controlo do processo iterativo (segunda interação)	63
Tabela 11. Controlo do processo iterativo (terceira e última iteração)	64
Tabela 12. Estimação dos fatores horários domésticos. Perdas reais.....	65

Abreviaturas

Lista de abreviaturas (ordenadas por ordem alfabética)

AES	Água Entrada no Sistema
AF	Água Faturada
ANF	Água Não Faturada
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
IWA	<i>International Water Association</i>
PA	Perdas de Água
PR	Perdas de água Reais
SAA	Sistemas de Abastecimento de Água

Capítulo 1

Introdução

1.1 - Objetivos

Esta tese é um trabalho académico final necessário para a obtenção do Mestrado em Engenharia Civil.

Foi elaborado em colaboração com o FEUP (Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto) e a ETSICCP (Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos) de Valência.

1.1.1- Objetivos técnicos

O objetivo principal desta dissertação é a modelação numérica e calibração dos consumos efetivos e perdas reais de uma rede de distribuição de água, a previsão temporal (horária) dos consumos efetivos com base em dados habitualmente disponíveis (distribuição espacial de volumes faturados, caudais totais entregues à rede e caudais de grandes consumidores) e de uma estimativa das perdas reais máximas (noturnas).

1.1.2- Objetivos formativos

Enquanto aos objetivos formativos, ressaltam os seguintes:

- Uso e melhora dos conhecimentos sobre programas informáticos utilizados na engenharia, neste caso os programas específicos Excel (uso geral), Matlab (programação) e EPANET (modelação e simulação de redes hidráulicas).
- Uso e melhora dos conhecimentos obtidos durante a licenciatura e o mestrado.
- Adquisição de novos conhecimentos gerais sobre engenharia e redação de projetos.
- Adquisição de novos conhecimentos específicos sobre redes de abastecimento de água.
- Aumento da capacidade de resolução de problemas e introdução à vida laboral.

1.1.3- Outros objetivos

Nos dias de hoje, o mundo está a atravessar uma mudança climática com nunca antes tinha experimentado, com fenómenos que afetam diretamente os recursos hídricos, como o aumento das temperaturas, as secas e o aumento do nível do mar.

É por isso que um dos objetivos desta dissertação é melhorar o funcionamento dos sistemas de abastecimento de água para reduzir as perdas destas e, desde modo, ajudar a mitigar os efeitos negativos destes problemas sobre o nosso planeta.

Além disso, as reduções das perdas de água implicam uma poupança económica para as entidades gestoras de água, para a administração e, portanto, para a população.

1.2 - Metodologia de trabalho

O trabalho foi elaborado em diversas fases realizadas pelo autor na seguinte ordem cronológica (algumas atividades têm decorrido em paralelo):

- Pesquisa bibliográfica
- Estudo do problema e aplicação da metodologia.
- Recolha e tratamento de dados de uma entidade gestora.
- Redação da dissertação.

Capítulo 2

Contexto e enquadramento

2.1- Recursos

A água é uma das substâncias imprescindíveis à vida de todos os organismos, tanto humanos como animais e vegetais. É um bem que abunda em muitas ocasiões, dependendo do momento e do lugar, mas que tem sempre de ser cuidado de todos os modos.

Na Terra, em diversas áreas, a água é uma substância que não tem faltado quase nunca, já que ocupa aproximadamente 70% da superfície do nosso planeta [1]. Naturalmente, tem havido épocas de seca ou há lugares áridos com mais problemas no acesso à água, mas, em geral, ao longo da história, tem sido um recurso renovável “ilimitado”, pois pode parecer infinita em alguns lugares. Não entanto, só 2,5% da água (o que não é pouca coisa) é doce e, deste 2,5%, as populações têm acesso aproximadamente a 1%. Com um consumo regular de água, e em condições normais, em zonas não áridas não há razões para que a água falte.

Agora, fatores importantes têm influenciado de um modo negativo as quantidades de água disponível:

- A primeira é a revolução do estilo de vida humano nos últimos séculos, a sobre-exploração de recursos e, com isto, o uso excessivo de recursos hídricos, não só para o consumo, mas também para abastecer a agricultura, a indústria e muitos outros usos.

- A segunda, e vem condicionada pela primeira, é a alteração climática, que está a originar mudanças contínuas nos territórios, no tempo e, portanto, nos recursos naturais. Algumas áreas têm-se tornado mais secas e os glaciares estão-se a fundir.

Tudo isto está a causar diferentes problemas no decurso da vida humana, um dos quais é o acesso à água potável, cada vez em mais zonas do mundo. Em Europa, infelizmente para

nós, há um risco médio-alto de não se ter acesso a água doce em quase tudo o território (como pode ver-se na **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), incluso em lugares que não têm climas áridos, ainda que, felizmente, tenhamos os recursos económicos e tecnológicos suficientes para obter água normalmente. Outros lugares têm menos sorte e a situação é cada vez pior.

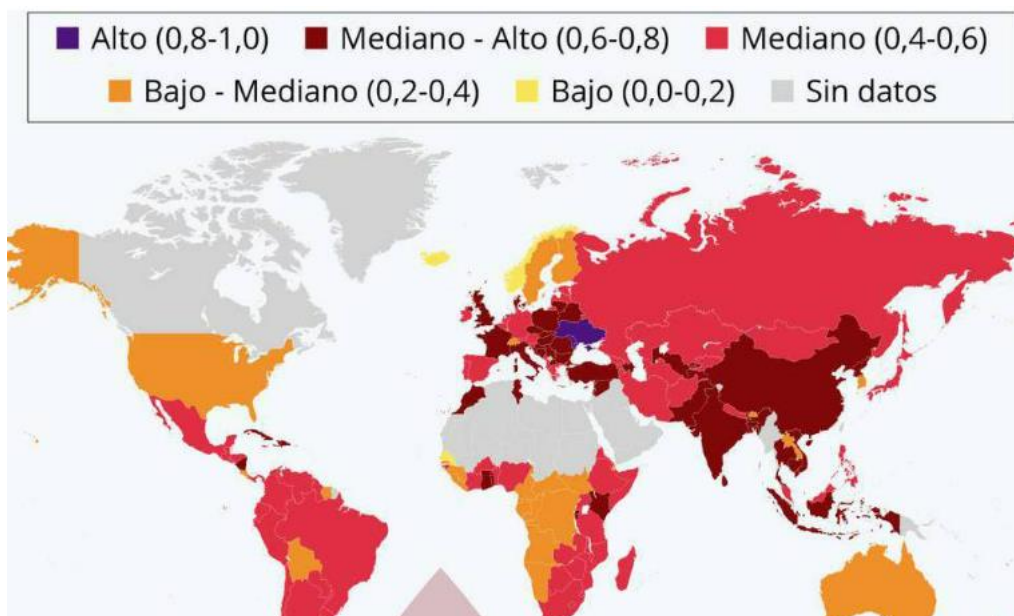


Figura 1. Risco de ter seca nos próximos anos por países [2]

Por enquanto, ainda que tenha havido melhores tempos, Espanha e Portugal não estão em risco extremo. De todo o modo, este problema tem de ser mitigado e uma das formas de o fazer é não desperdiçar a água disponível.

Tomando como exemplo o caso de Portugal, que está atravessando períodos de seca nos últimos anos, pois o balanço da água é negativo (cada vez há menos precipitação e maior consumo), por tanto os reservatórios estão a ser usados demais. Olhando a **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, extraída do Instituto Português do Mar e da Atmosfera, se pode ver que a maior parte do território português está em período de seca (a data de 2022).

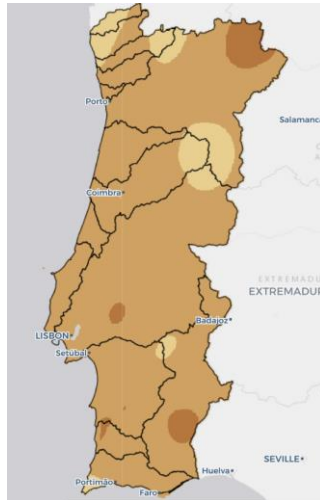


Figura 2. Intensidade da seca em Portugal (abril 2022) [3]

Quadro– Classificação do índice PDSI para períodos secos e períodos chuvosos		
Legenda de cores	Classes do PDSI	Descrição
maior ou igual que 4,0	Chuva extrema	Chuva extrema
3,00 a 3,99	Chuva severa	Chuva severa
2,00 a 2,99	Chuva moderada	Chuva moderada
1,00 a 1,99	Chuva fraca	Chuva fraca
-0,99 a 0,99	Normal	Normal
-1,99 a -1,0	Seca fraca	Seca fraca
-2,99 a -2,0	Seca moderada	Seca moderada
-3,99 a -3,0	Seca severa	Seca severa
menor ou igual a -4,00	Seca extrema	Seca extrema

Tabela 1. Níveis de seca

2.2- Economia

Sem dúvida que na vida há sempre com aspetos relacionados com o dinheiro pelo que, sendo a água um bem indispensável em si mesmo, não pode deixar-se de lado a economia. Ainda que a água seja um bem relativamente barato em muitas partes do mundo, não sempre é assim.

Segundo um estudo da IAGUA [4] os preços da água potável em diversas cidades do planeta são os apresentados na ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..



Figura 3. Preços da água abastecida em vivendas do mundo por cidades

Logicamente, devido à dificuldade de acesso à água e fatores sociais, alguns países do norte da Europa têm um preço mais elevado. Mas em comparação com o salário médio da população, o Brasil tem a tarefa de água mais elevada do mundo. Entretanto, para os países nórdicos e mais desenvolvidos da Europa, a tarifa comparada com o poder aquisitivo dos cidadãos é menor.

Como exemplo dum meio termo entre as duas situações, pode tomar-se a cidade do Porto (Portugal), onde o custo da água da torneira é de quase de 1,70 €/m³, o que pode repercutir, numa família humilde, numa fatura de quase 5% do salário do chefe de família. Portanto, além dum problema natural para o planeta, a escassez de água poder trazer problemas económicos em algumas sociedades.

É interessante, também, salientar que, como pode ser lógico, os países com salários mais elevados dispõem dum abastecimento de água de maior qualidade, como pode observar-se na

¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..

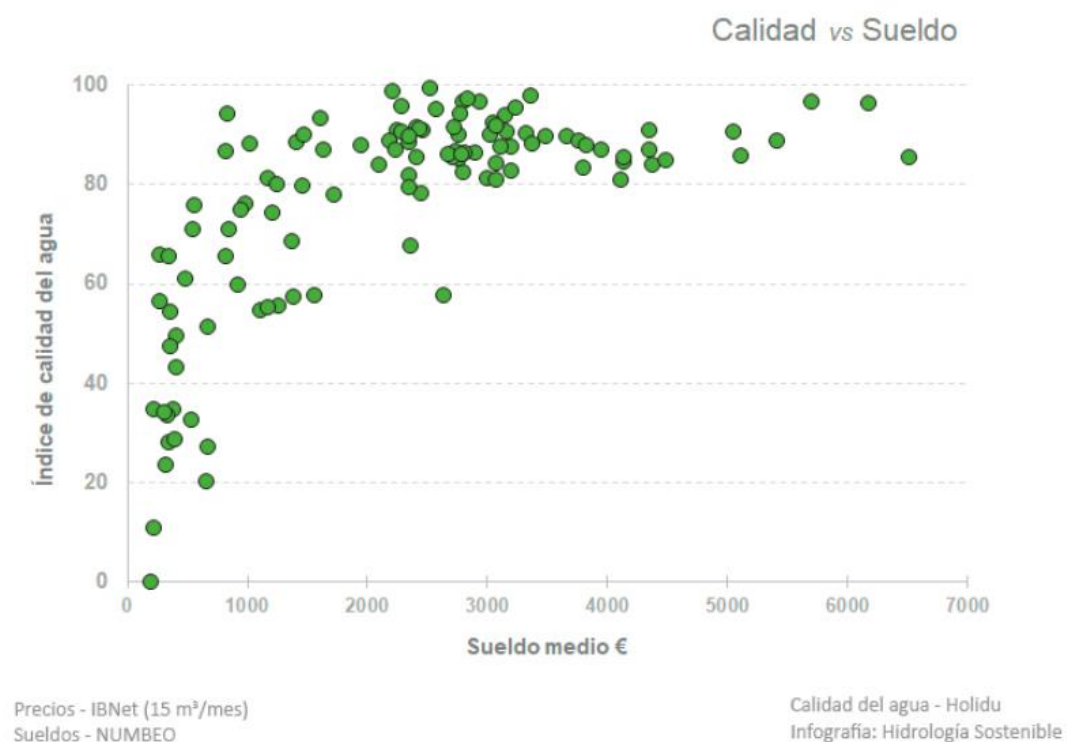


Figura 4. Qualidade da água vs Salário medio

Não obstante, como se aprecia na Figura 5, a qualidade não está tão bem ligada com o preço da água (nesta tabela o preço está ponderado em relação ao salário dos cidadãos), o que indica uma desigualdade e um handicap para as famílias que vivem em zonas mais vulneráveis.

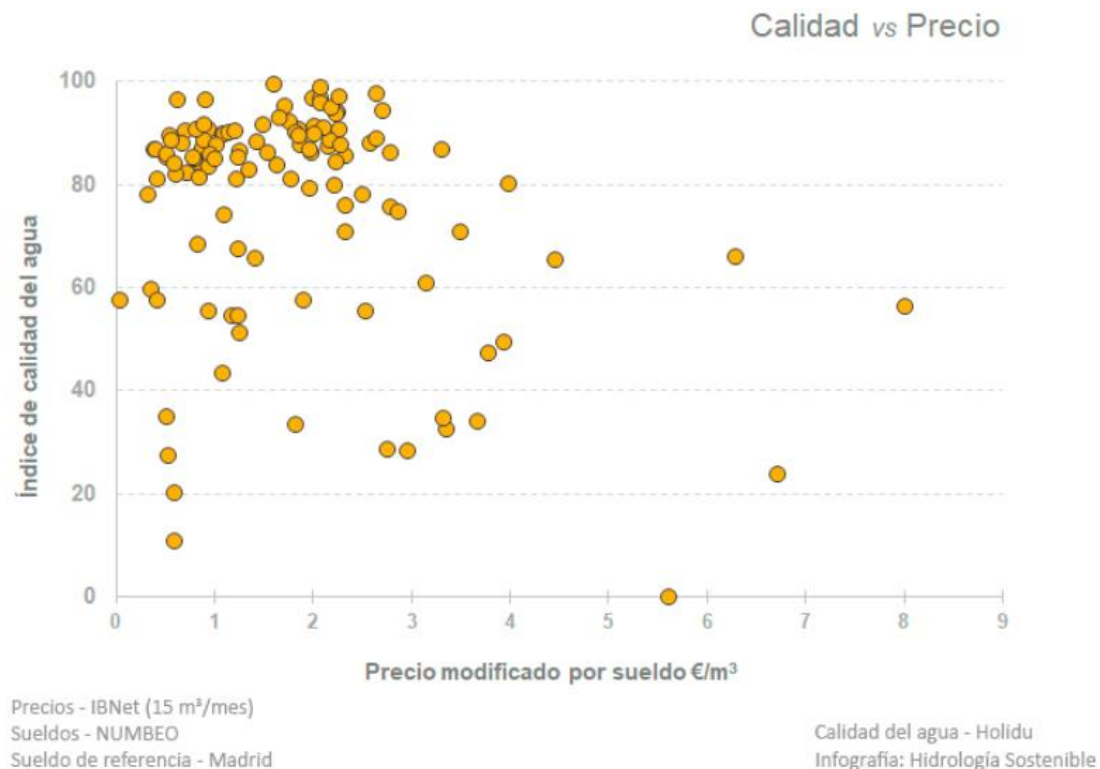


Figura 5. Qualidade da água vs Preço [4]

2.3- Caso de Portugal

2.3.1- Recursos hídricos

Em Portugal, tem-se uma relativamente boa quantidade-acessibilidade aos recursos hídricos, mas não repartidos de modo equitativo ao longo de tudo o território nacional (há mais riqueza hídrica ao norte do Tejo e litoral). Geralmente, Portugal tem um clima típico mediterrâneo, com temperaturas não extremas durante o ano, sendo suavemente quente no verão e suavemente frio no inverno. As chuvas, ao estar no Oceano Atlântico, são um pouco mais frequentes do que em Espanha ou Itália, mas também há épocas de seca quase todas as temporadas. Durante os períodos de seca é quando há mais risco de escassez, pois o abastecimento, tanto doméstico como industrial e agrícola, continua de todos modos. Os arquipélagos têm ainda um clima mais húmido e tropical, pelo que há mais abundância de água. A **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** mostra um exemplo do clima de Lisboa ao longo do ano 2021, onde pode ver-se que as temperaturas são mais ou menos

regulares, com períodos levemente quentes no verão. No entanto, as chuvas são sensivelmente irregulares durante o período estival, apresentando períodos de seca nalguns anos.

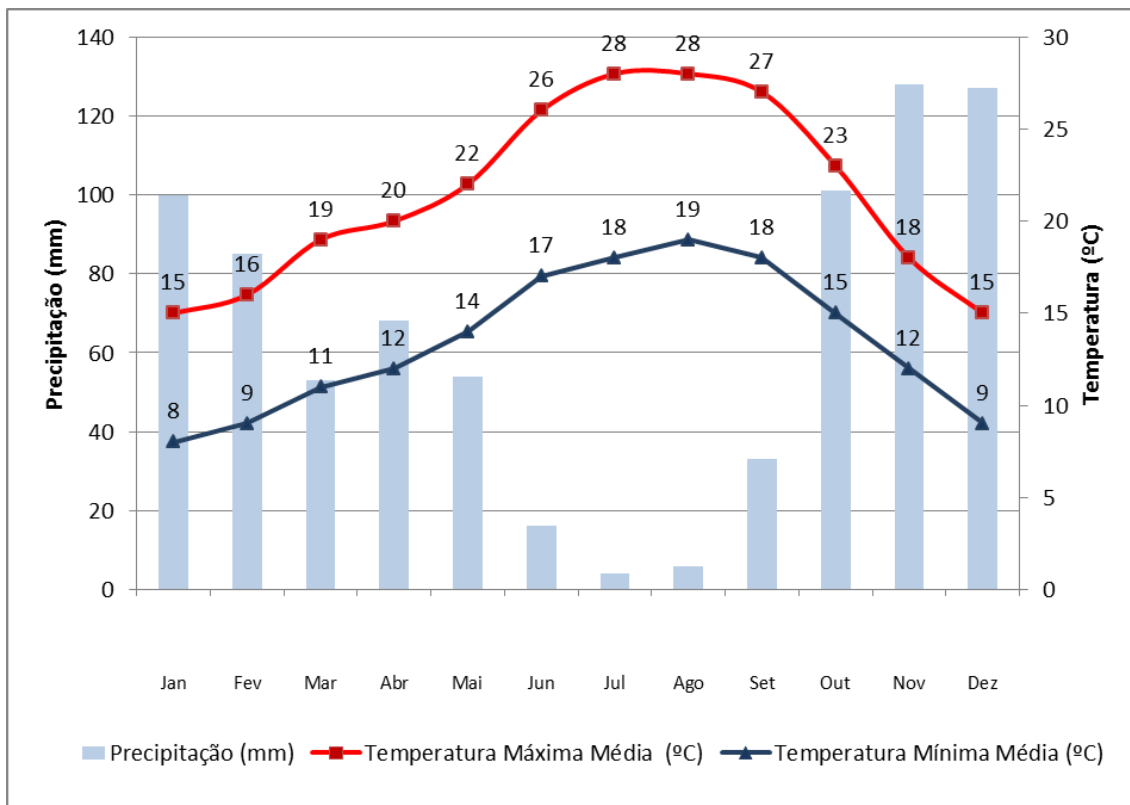


Figura 6. Clima em Lisboa durante 2021

O Plano Nacional da Água (PNA) de 2015, diz que em Portugal, normalmente, não há períodos de forte stress hídrico, no entanto, há períodos de descida dos níveis das reservas de água, os quais têm de ser controlados (sobretudo nas áreas mais secas do território). [5]

2.3.2- Estimativas de consumo

No território luso, como na maior parte de Ocidente, o setor que mais água consome é o agrícola, com mais do 80% deste, depois é o urbano (12%) e o industrial (7%), com consumos similares e relativamente baixos em comparação com o primeiro. Dentro do consumo urbano de água, 64% está destinada ao consumo doméstico, ou seja, quase um 8% do total. Mas, ainda que não seja o volume mais importante em quantidade, esta água tem de ser de

máxima qualidade e requer infraestruturas complexas para garantir o seu correto abastecimento. Portanto, é dedicado um grande esforço económico neste campo.

Para fazer uma ideia destes valores, a evolução dos consumos totais de água em Portugal, e distribuídos por regiões, pode ver-se na Tabela 2. Ainda que os recursos hídricos não estejam a aumentar, o consumo de água tem uma tendência claramente ascendente em todas as regiões do país. Calculando o consumo médio da população em Portugal, obtém-se um valor médio diário anual aproximado de 130 litros por dia e por habitante.[6]

m³ - Milhares

Territórios	Água distribuída pela rede pública					
Anos	1995	2006	2009	2013	2018	2019
Portugal	522.534	± 576.895	x	643.229	662.561	(R) 672.634
Continente	479.510	± 521.014	± 645.891	597.137	610.033	(R) 625.009
Norte	119.911	± 146.975	167.631	151.650	158.105	161.133
Centro	106.876	± 116.787	139.459	125.006	131.020	134.930
Área Metropolitana de Lisboa	181.847	± 176.206	234.284	233.843	221.603	221.737
Alentejo	42.352	± 42.215	53.021	44.611	46.030	48.149
Algarve	28.524	± 38.830	51.496	42.027	53.275	(R) 59.059
Região Autónoma dos Açores	20.323	± 34.756	x	20.024	26.551	x
Região Autónoma da Madeira	22.701	± 21.125	x	26.068	25.977	26.202

Simbologia

- ⊥ Quebra de série
- ... Confidencial
- // Não aplicável
- Ausência de valor
- Pre Valor preliminar
- Pro Valor provisório
- x Valor não disponível
- f Valor previsto
- Rv Valor revisto
- e Dado inferior a metade do módulo da unidade utilizada
- N Valor negligenciável
- s Valor estimado
- u Valor incerto ou não confiável
- § Dado com coeficiente de variação elevado
- (R) Dados retificados pela entidade responsável

Tabela 2. Água distribuída pela rede pública em Portugal [10]

Em Portugal, o consumo doméstico de água em 2018 (último ano com dados completos neste estudo) pode estimar-se em 662 milhões de m³.

O Guia técnico nº 8 de 2006 “Uso eficiente da água no setor urbano” da Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos (ERSAR), ilustra a distribuição de consumos por módulos dentro do consumo doméstico. Estas estimativas foram obtidas em cidades onde as populações geralmente trabalham fora das residências, i.e., não fazem toda a vida dentro destas. Há cidades que não são representativas dum consumo geral da população como, por exemplo, a cidade de Lisboa, onde uma parte relativamente grande das pessoas já está reformada e, portanto, passam mais tempo a casa, pelo que os consumos variam menos ao longo do dia e da semana.



Figura 7. Estrutura dos consumos domésticos

A Figura 7 mostra a divisão dos consumos, sendo mais da metade aproximadamente derivado dos usos das casas de banho (pode ver-se que o duche e autoclismo geram um grande consumo de água). Seguem-se as torneiras com 16% do peso, e as outras utilizações estão já mais repartidas. Assim, pode observar-se um consumo desmesurado nas casas de banho, o qual provavelmente poderia ser reduzido. Os autores do guia acima referido, afirmam que, habitualmente, os consumidores não têm consciência da escassez de recursos hídricos.

2.4- Necessidade de adotar medidas

Com o acima detalhado, percebe-se a necessidade de reduzir os impactos negativos da diminuição de recursos hídricos (especialmente de água potável) no nosso entorno. Isto causa problemas graves relacionados com a seca em grande parte do mundo, especialmente em países com climas áridos. Além disso, vem-se mais afetados os territórios com menor capacidade económica.

Portugal é um país no qual o problema da seca está a aumentar nos últimos anos e, também, não é um país com tantos recursos económicos como os do norte da Europa que, não tendo mais recursos hídricos, tem outros meios para poderem abastecer-se sem dificuldades.

Para mitigar estes problemas, é preciso adotar diversas medidas:

- Estudar a estratégia a adotar, a qual vai depender dos outros pontos a seguir mencionados.
- É necessária uma análise exaustiva das disponibilidades de água e da acessibilidade a esta na zona de atuação.
- Para este tipo de problemas, é também importante ter presente a máxima “*think globally, act locally*” [7], o que em português quer dizer “pensar globalmente, atuar localmente”. Esta frase é atribuída ao planificador de cidades e ativista social Patrick Geddes⁴. Esta filosofia é usada por muitas sociedades e organizações, sendo promovida também pelas Nações Unidas para a implantação, entre outras iniciativas, da Agenda 2030.



Figura 8. Objetivos Desenvolvimento Sustentável

Diversos pontos da Agenda 2030 têm importância na presente tese, mas convém destacar o ponto 6 “Água potável e saneamento”, um dos objetivos da qual é garantir o acesso a água de qualidade, de forma eficiente e econômica em todo o mundo.

Seguindo esta ideia e entrando de forma mais específica no decorrer do trabalho, para alcançar os objetivos anteriores é necessária uma série de ações, uma das quais é a redução das perdas de água em redes de abastecimento. Para isto é importante focar-se em duas importantes tarefas, que vão ser detalhados adiante: a realização do balanço hídrico e o aumento do controle das redes de distribuição.

Capítulo 3

Balanço hídrico e perdas de água

3.1- Balanço hídrico

O primeiro a fazer é o Balanço Hídrico (Figura 9). A International Water Association (IWA) [9] tem estado a elaborar a melhor forma de aproximar um balanço hídrico, seguindo uma série de fórmulas e indicações. Este balanço tem adquirido uma grande importância no campo dos recursos hídricos e agora é usado por administrações, empresas e outras organizações em todo o mundo.

Água Entrada no Sistema	Consumo Autorizado	Consumo Autorizado Facturado	Consumo Facturado Medido	Água Facturada
			Consumo Facturado Não Medido	
	Perdas de Água	Consumo Autorizado Não Facturado	Consumo Não Facturado Medido	Água Não Facturada
			Consumo Não Facturado Não Medido	
		Perdas Aparentes	Consumo Não Autorizado	
			Erros de Medição	
		Perdas Reais	Fugas nas Condutas	
			Fugas nos Reservatórios	
			Fugas no Ramais	

Figura 9. Balanço hídrico

Devido a interpretações muito variadas do termo "Água não contabilizada" (ANC) em todo o mundo, foi recomendado em 2000 que o termo fosse descontinuado, pelo que agora é pouco utilizado internacionalmente. Se o termo ANC for utilizado, deve ser definido e calculado da mesma forma que a Água Não Faturada (ANF) no Balanço de Hídrico da IWA.

Numerosas aplicações informáticas baseadas no Balanço Hídrico da IWA foram introduzidas e utilizadas a nível nacional, estatal e de entidades de utilidade pública na maioria das regiões do Mundo nos últimos 20 anos. Algumas contribuições práticas, que podem ajudar a evitar erros e mal-entendidos na aplicação e interpretação do Balanço Hídrico da IWA, são apresentadas na versão seguinte do Balanço Hídrico da IWA.

Este modelo de cálculo requer um grande input de informação e o conhecimento de muitas componentes do balanço para se poder calcular as outras. Conhecido o balanço, o objetivo seguinte deverá ser a redução de todas as parcelas da ANF e, simultaneamente, o aumento da Água Faturada (AF), como se preconiza na [\[Error! No se encuentra el origen de la referencia..\]](#)

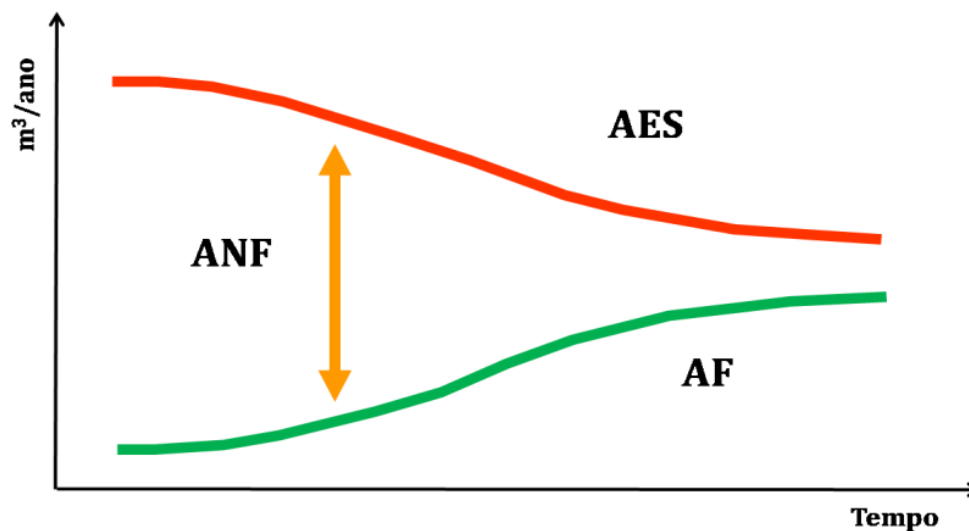


Figura 10. Redução ANF respeito AF

Em Portugal, o problema da ANF é maior do que se pode intuir normalmente, pois mais de 30% da Água de Entrada no Sistema (AES) é ANF, como se pode observar na Figura 11.

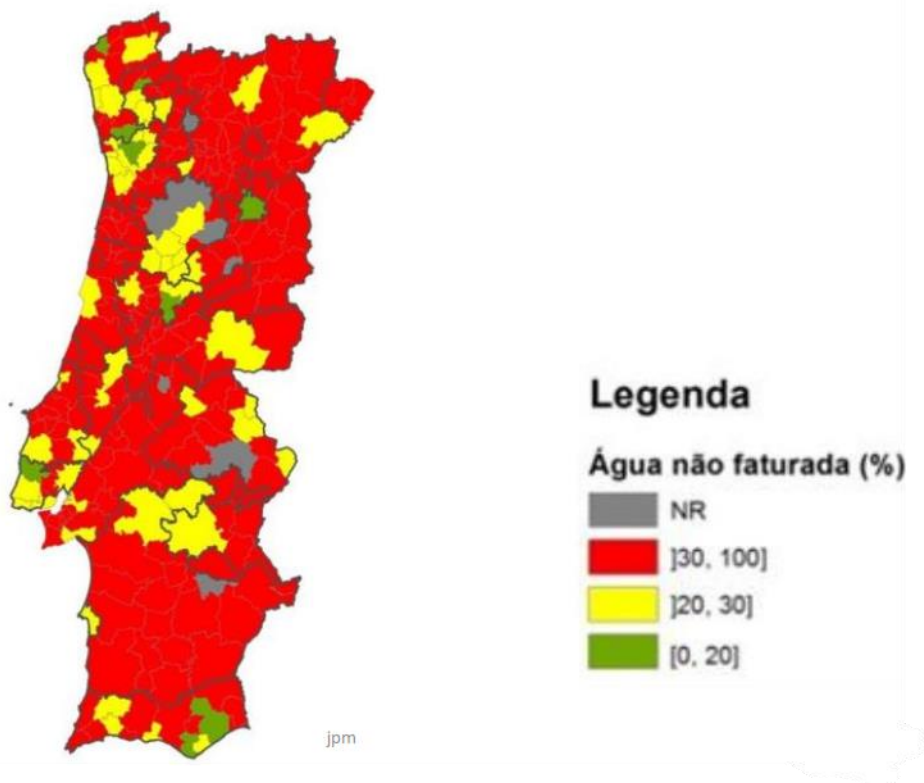


Figura 11. Percentagem ANF em Portugal

3.1.1- Água Não Faturada

A Água Não Faturada (ANF) representa a água que, tendo sido produzida ou entrada no sistema em análise, se “perde” uma vez que não é faturada aos clientes desse sistema por diversos motivos (perdas em condutas e reservatórios, uso ilegal, submedição de consumos, etc.). Parte deste problema pode remediar-se por meio de ações técnicas ou administrativas apropriadas. A redução das perdas reais e dos usos ilegais disponibiliza um volume adicional de água para fazer face a uma procura que não seja satisfeita, se for o caso, ou para a redução da despesa de produção e/ou aquisição de água. Por outro lado, a redução das submedições e, também, a eliminação das utilizações ilegais, contribuem para o aumento da faturação da entidade gestora do sistema. Estes dois efeitos combinados - redução da despesa e aumento de faturação - geram uma liquidez adicional que pode ser utilizada em investimentos e/ou na redução da tarifa da água vendida aos consumidores.

A IWA estabelece uma diferença entre água que não gera receita, o consumo autorizado não faturado, e as perdas de água, aparentes ou reais. Ou seja, nas perdas de água não está incluída a que é consumida legalmente, embora não seja faturada e, por consequência, não paga. Em resumo, a Água Não Faturada (ANF), i.e., aquela que não gera benefício económico, é constituída pela soma do consumo autorizado não faturado (CANF), pelas perdas aparentes

(PA; submedições e usos ilícitos) e pelas perdas físicas reais (PR, fugas e extravasamentos em reservatórios e as fugas em condutas e ramais prediais).

Como em todas as áreas económica e socialmente complexas, há um debate sobre qual o melhor modo de medir as diversas componentes do balanço hídrico. Calculando a percentagem da componente em relação ao volume de água entrado no sistema, as companhias com grandes níveis de consumo, ou redes mais compactas, apresentam um melhor desempenho que as empresas com baixos níveis de consumo, ou redes mais expandidas. Com o objetivo de ter em conta estas diferenças, tem sido obrigatório contabilizar a água não faturada de três modos diferentes:

- Diferença entre a Água Entrada no Sistema (AES) e a Água Faturada (AF), i.e., a Água Não Faturada (ANF), expressa em percentagem da AES;
- Volume de perdas reais (PR) por quilómetro de tubagens de distribuição e por dia, expresso em $\text{m}^3/\text{km}/\text{dia}$;
- Volume de perdas reais por ramal de ligação e por dia, expresso em $\text{m}^3/\text{ramal}/\text{dia}$.

Assim, deste modo, pode-se fazer uma comparação adequada entre estes valores, apropriados para diferentes tipos e tamanhos de redes, e aplicar a normativa a um número maior de casos.

Alguns dos aspetos importantes referidos anteriormente, como a escassez de água e as perdas económicas que geram a ineficiência no abastecimento, não estão de acordo com a mentalidade de melhoria continua da nossa sociedade. Esta forma de pensar está cada vez mais instaurada nas empresas, e respetivas administrações, sendo quase obrigatória a busca da excelência operacional em todos os atos de gestão realizados. Nos dias de hoje, como sociedade, temos ao nosso alcance os mais avançados recursos técnicos e tecnológicos, como o “Big Data”, por exemplo, dotando as companhias de uma extensa base de informação para enfrentar estes desafios.

Os grandes níveis de água não faturada que se apresentam em alguns territórios são um indicador de ineficiência, pois com os recursos mencionados anteriormente, e muitos outros disponíveis, pode-se melhorar de um modo significativos estes resultados. Um dos modos de

melhoria é o aumento do controlo das perdas, objetivo principal deste trabalho.

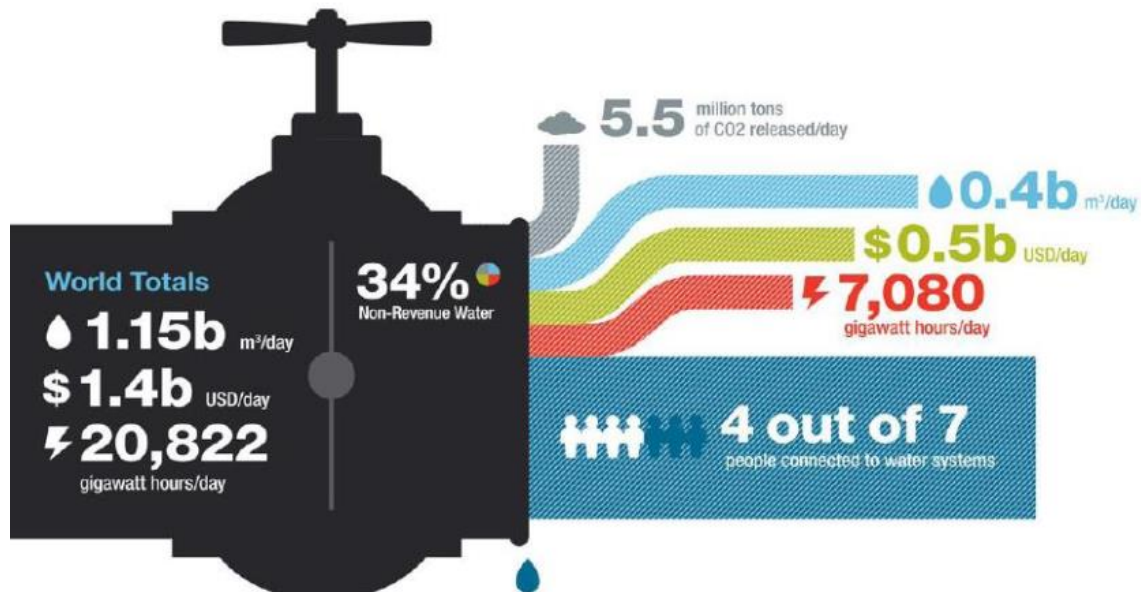


Figura 12. ANF mundialmente

A ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. mostra, a nível mundial e de um modo muito resumido, o que representa a Água Não Faturada (ANF) para os nossos sistemas de abastecimento, tanto para a economia como para o ambiente. Os 34% da água emitida através das nossas tubagens e que não é faturada corresponde a um litro de cada três, o que significa um grande volume de perdas que pode ser reduzido. Há uma frase de David Bornstein, em “The Art of Water Recovery,” The New York Times, July 10, 2014, que pode fazer ver esta água não faturada desde uma perspetiva mais esclarecida:

“Imagine que dirige uma empresa que vende água engarrafada. Gasta-se muito dinheiro, e utiliza-se muita energia, bombeando a água para fora do solo, purificando-a e transportando-a para venda. Então, um dia, descobre que um grande número de garrafas nunca chega às lojas. Estão a cair através de buracos nos camiões. Não gostaria de saber o que poderia ser feito a este respeito? Não seria uma loucura permitir que a situação continuasse? Bem, é isso que está a acontecer com muitos serviços de abastecimento de água nos Estados Unidos”.

Pois bem, isto é o que acontece com a água não faturada, o bem mais importante para o decorrer das nossas vidas.

Segundo o professor Joaquim Poças Martins⁷, da FEUP, para reduzir o volume de água não faturada, tem de se seguir uma estratégia com as seguintes características:

- Primeiro, conhecer a quantidade de água que está a ser perdida, mediante o cálculo das componentes do balanço hídrico;
- Segundo, tratar de saber onde está a ser perdida esta água. Têm de ser quantificadas as perdas reais e as perdas aparentes, diferenciando bem entre as duas.

- Depois, conhecer o motivo pelo qual esta água está a ser perdida: realizar uma auditoria às redes e às práticas operacionais, para conhecer os pontos fracos e os pontos fortes.
- Averiguar quais as medidas para melhorar o desempenho das redes, i.e., reduzir as perdas tendo em conta as anteriores alíneas. Para isto é necessário elaborar uma estratégia e adotar um plano de ação.
- Por último, mas não menos importante, ter a capacidade de manter a estratégia e os resultados obtidos depois da melhoria, com investimentos em formação de pessoal e manutenção das redes.

Os fatores e as razões pelas quais existe água não faturada são geralmente complexas e difíceis de apurar. É quase impossível ter uma eficiência de 100%, mas quando há diferenças tão grandes de AF face à AES, é porque, com quase toda segurança, a gestão é significativamente melhorável.

Na **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, apresenta-se um resumo das medidas para reduzir a Água Não Faturada (separadas por tipos de ANF).

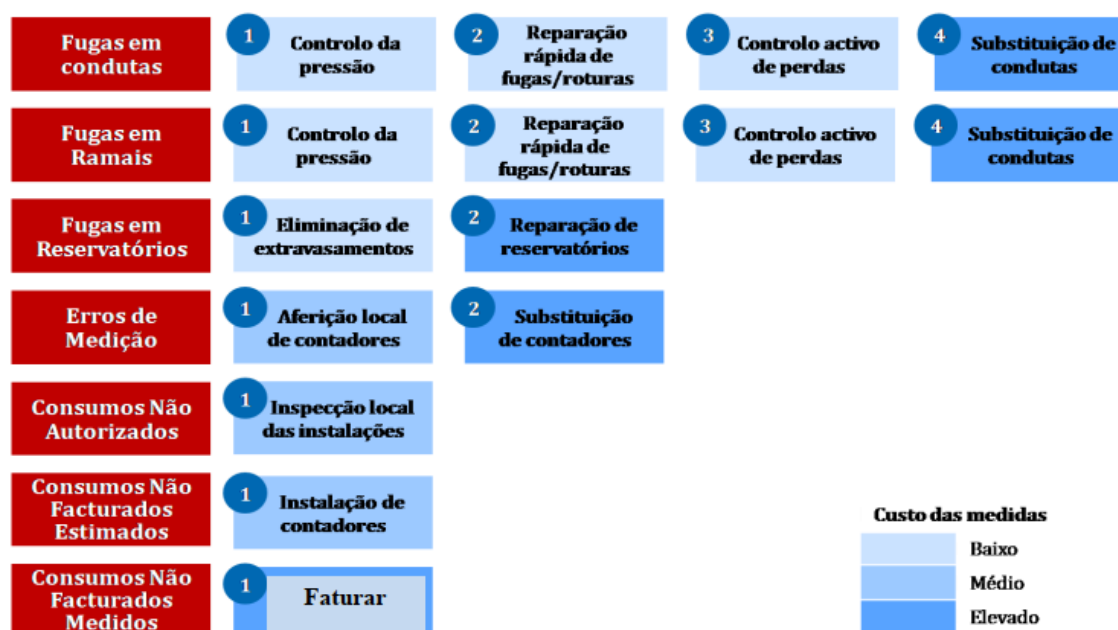


Figura 13. Medidas para reduzir a ANF

Como se pode observar, há diferentes tipos de medidas, tanto físicas como de controlo, que deveram ter seleccionadas em cada caso, segundo o que for necessário.

3.2- Perdas de água

Dentro do balanço hídrico, uma das componentes mais importantes a caracterizar é a das perdas de água, que se podem dividir em perdas reais (PR) e perdas aparentes (PA), as quais, como tem sido explicado em subcapítulos anteriores, são uma parte do problema relacionado com a escassez de recursos hídricos e algumas perdas económicas e energéticas. As perdas podem ocorrer em diversas localizações da rede de abastecimento de água. Em muitas destas, representam a maior parte da água não faturada, explicada no subcapítulo anterior. Segundo um estudo do The World Bank, se só a metade da ANF fosse poupada, mais de 100 milhões de pessoas mais teriam acesso a água potável sem necessidade de aumentar os investimentos. As perdas de água, à parte o mencionado, também implicam o aumento na emissão de gases de efeito estufa, já que essa água perdida foi bombeada e distribuída usando energia. A isto acresce a energia consumida no tratamento da água perdida pelos sistemas de abastecimento (aqui também se inclui a dessalinização, quando é o caso).

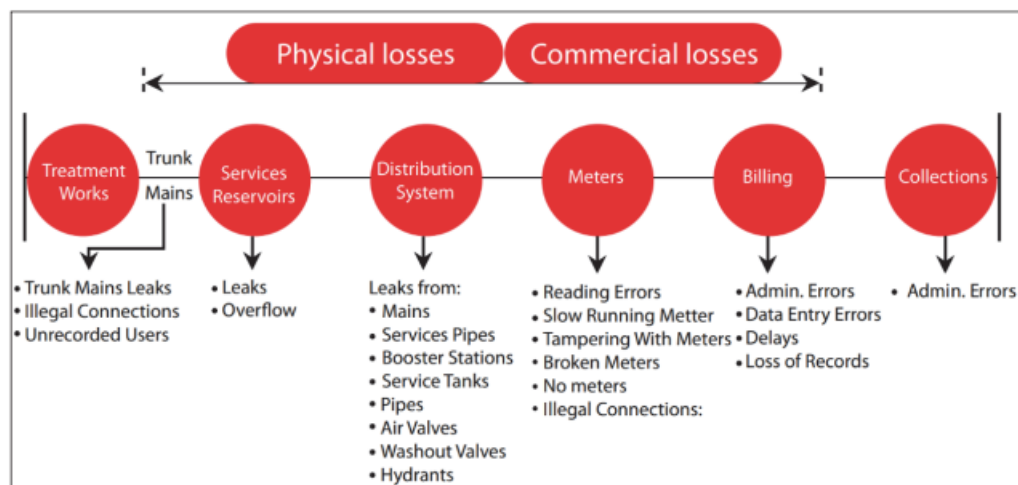


Figura 14. Perdas típicas numa rede de abastecimento

Na ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia., tomada do livro The Manager's Non-Revenue Water Handbook, pode ver-se, de forma geral, alguns dos motivos pelos quais existem perdas na maior parte das redes de abastecimento de água potável. Mas, se se indaga mais, e se faz uma comparação a nível mundial, as diferenças entre PR e PA, em relação às perdas totais, tem uma grande variabilidade entre países. Por exemplo, em África, onde muitos países têm relativamente escassos recursos económicos, os consumos ilegais são superiores aos dos países ricos de Ocidente, devido à pobreza das pessoas e a água ser um bem essencial para a vida. Portanto, as perdas aparentes são maiores que as perdas reais.

Também, os governos têm menor capacidade para medir este tipo de perdas. Pelo contrário, em países desenvolvidos, como os do norte da Europa, as perdas são menores em geral, e, ademais, as perdas aparentes são menores que as reais devido a um maior controlo das redes.

Os principais benefícios da redução das perdas de água são a redução dos custos da bombagem e de tratamento das águas, aumento das faturas de água, adiamento da necessidade de investimentos em novas infraestruturas hidráulicas e de utilização de novos recursos hídricos, proteção da qualidade da água e redução dos riscos de doenças transmitidas pela água, redução da frequência de rebentamentos de tubos e cortes de água, prolongamento da vida útil das tubagens e outros equipamentos, e melhoria da satisfação dos clientes das redes. Compreender e quantificar a ANF e as componentes de perdas é o primeiro passo para a gestão das perdas de água urbanas. Além disso, as empresas de abastecimento de água devem ter um compromisso a longo prazo para desenvolver uma estratégia de redução de ANF.

Uma vez conhecido o conceito de balanço hídrico, água não faturada e a estratégia de planificação a seguir, é importante ter um método de diminuição de perdas.

3.2.1- Método de diminuição de perdas

- O primeiro passo é dividir a rede de distribuição em Zonas de Medição e Controlo (ZMC). É difícil gerir as perdas de água numa grande rede de distribuição de água porque as perdas de água calculadas representam uma média de toda a área. Por conseguinte, é um procedimento bem aceite dividir uma grande rede em pequenas zonas, que podemos denominar como Zonas de Medição e Controlo (na literatura em língua inglesa são designadas por *District Meter Areas*, ou DMA), a fim de gerir as perdas de água eficazmente e também para monitorizar a quantidade e qualidade da água de forma eficiente, reparando mesmo as pequenas variações dos parâmetros de quantidade e qualidade da água. A água é fornecida a cada zona de medição em um ou mais locais, onde os caudais e as pressões de água são monitorizados, o que permite o controlo. Consequentemente, o balanço hídrico em cada zona de medição pode ser calculado e as medidas de gestão podem ser efetivamente aplicadas.

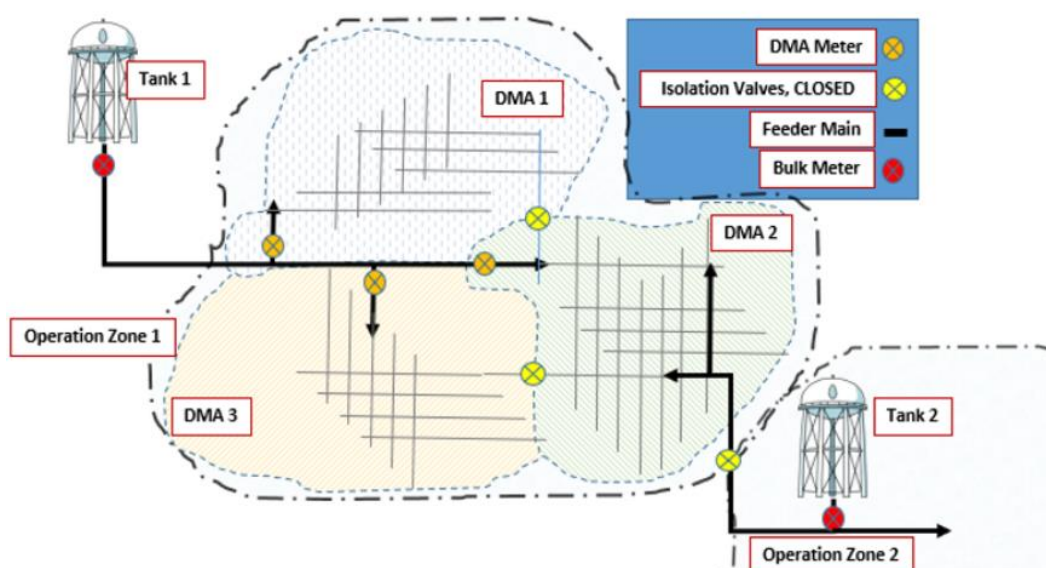


Figura 15. Exemplo geral de áreas de medição numa rede [11]

A Figura 15 mostra um caso teórico duma possível divisão duma rede de abastecimento, obtida pela DTK HYDRONET.

- O seguinte passo deveria ser a avaliação e o controlo, ou monitorização, da rede de abastecimento. Monitorizar os caudais, as pressões de água, os níveis de água nos reservatórios e os consumos de energia nas redes de distribuição é crucial para estabelecer o balanço hídrico, detetar fugas, fornecer conjuntos de dados para o modelo hidráulico e de qualidade da água, e gerir as perdas de água. Muitas autoridades hídricas têm agora supervisão e controlo dos dados das redes, onde muitos parâmetros de qualidade e quantidade de água potável são continuamente monitorizados, analisados e avaliados em tempo real, graças a um sistema integrado. O sistema integrado pode também cobrir as estações de bombagem, reservatórios de equilíbrio/serviço, origens de água e muitas instalações localizadas na rede de água. O sistema monitoriza normalmente os níveis de água nos reservatórios, o funcionamento das bombas nas estações de bombagem e a posição das válvulas (abertas, fechadas, parcialmente abertas) na rede para além dos consumos de energia e água. Os ecrãs dos sistemas de visualização podem mostrar o caudal instantâneo de água, volume de água armazenada e mais dados com dependência da capacidade do sistema. O sistema pode dar automaticamente alarmes quando os conjuntos de dados medidos não se encontram dentro dos limites pré-determinados. Além disso pode produzir relatórios e gráficos para análises polivalentes. É importante monitorizar e avaliar o caudal noturno mínimo da zona de medição e controlo, pois, normalmente, nos horários noturnos, quando o consumo é menor, é quando se geram as perdas máximas (ao menor consumo correspondem perdas de carga nas condutas mais reduzidas, logo uma maior pressão na rede que agrava as fugas de água).
- Outro ponto importante é a correta e eficiente modelação da rede de distribuição de água. A modelação hidráulica é utilizada para prever os parâmetros hidráulicos tais como velocidade, caudal e pressão da água. As previsões podem ser acertadas em diferentes localizações da rede (por exemplo, nos pontos finais, nos pontos mais altos

ou mais baixos, antes ou após os reservatórios de distribuição, etc.) e também nas épocas desejadas, datas (diferentes dias da semana) e horários (diferentes horas do dia). Assim, é possível prever os parâmetros hidráulicos no espaço e no tempo. A modelação hidráulica é uma ferramenta poderosa para prever os impactos de diferentes cenários de gestão sobre a hidráulica da rede de distribuição, tais como a diminuição das perdas de água e a redução dos consumos de água. No entanto, o modelo hidráulico deve ser bem calibrado e verificado através da utilização de diferentes e numerosos conjuntos de dados recolhidos através de monitorização. Consequentemente, os modelos podem produzir previsões fiáveis. Para este fim, no presente trabalho, foi utilizado o *software* EPANET, o qual vai ser detalhado adiante.

- Também é importante ter um grande controlo da pressão nas tubagens⁹. A pressão da água no sistema de distribuição é afetada principalmente pelas cotas dos tubos, dos reservatórios e de outros elementos (e.g., as estações de bombagem, se existirem) e, ainda, a variação do consumo de água. A variação do consumo de água leva à variação da velocidade do escoamento nas condutas e, consequentemente, à variação das perdas de carga. Como resultado, a pressão da água apresenta geralmente variações espaciais e temporais consideráveis. Por conseguinte, o nível de pressão da água em algumas localizações pode não estar em conformidade com os regulamentos existentes. Os modelos hidráulicos são ferramentas eficientes para prever as variações espaciais e temporais da pressão da água. A rede de distribuição, como já foi referido, deve ser dividida em várias zonas de medição e controlo com dimensões adequadas, a fim de aplicar a gestão da pressão. A pressão da água é normalmente medida na entrada da zona e nos pontos críticos de pressão. Podem ser utilizados diferentes tipos de Válvulas Redutoras de Pressão (VRP) para regular a pressão nos pontos críticos. O excesso de pressão da água implica perdas adicionais na rede. Portanto, a redução da pressão da água leva, por si só, a uma redução imediata das fugas. Além disso, evitar o excesso de pressão da água tem muitos benefícios, tais como a redução de rebentamentos de tubos e o aumento da vida útil das condutas e de outros equipamentos.
- Finalmente, tudo estes aspetos conduzem à redução das perdas de água. Primeiro as perdas reais, graças a uma correta estratégia, a um controlo da pressão, à realização das necessárias reparações e à gestão do património. Cada uma destas atividades cria uma sinergia com as outras, pelo que em conjunto contribuem para que os efeitos positivos se multipliquem. Depois, as perdas aparentes, que não sendo reais, geram uma perda de receita que, uma vez controlada, permite concentrar esforços nas perdas reais. Para o efeito tem de se reduzir ou eliminar as utilizações ilegais da água, fazer uma correta medição dos consumos (e.g., substituindo os contadores) e ter um bom controlo dos dados da rede. Na **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** podem ver-se, a modo de exemplo, as PR por municípios em Portugal.

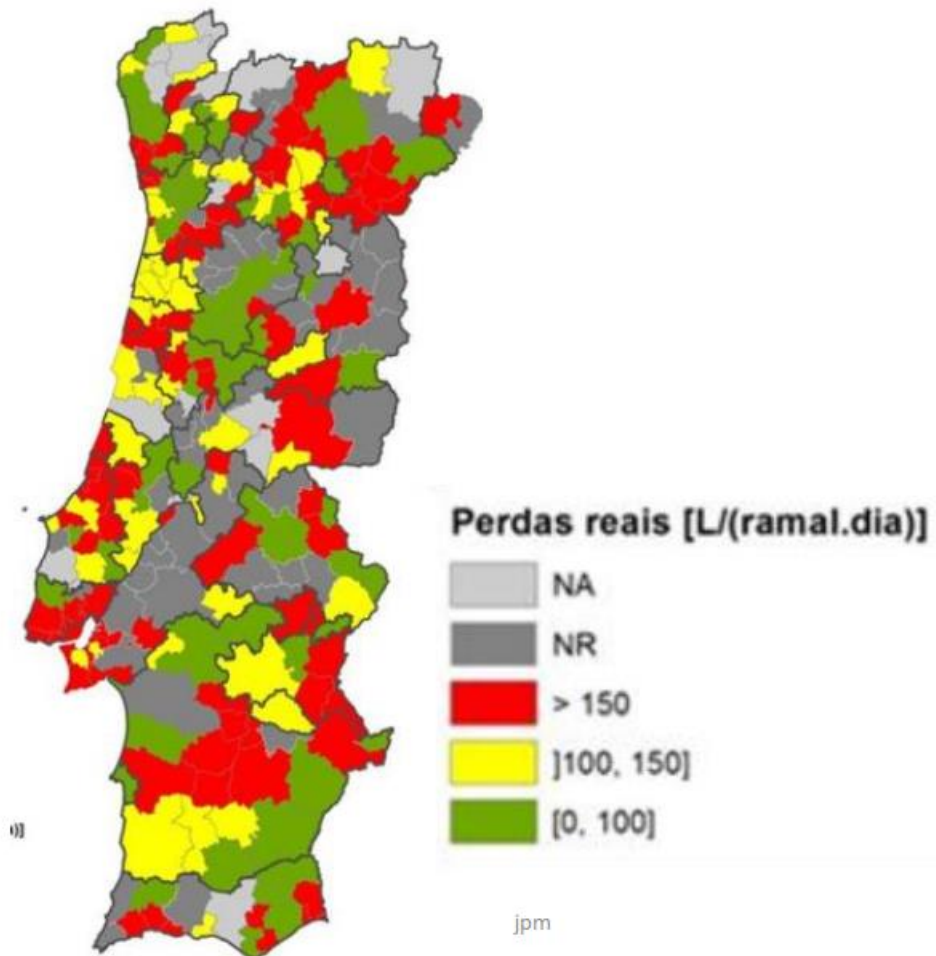


Figura 16. Perdas reais em Portugal

3.2.2- Resultados esperados

Depois de fazer uma análise exaustiva da rede de distribuição de água e atuar sobre as perdas, é de esperar a obtenção de uma serie de resultados positivos, tanto económica como ecologicamente. Dependendo do tipo de organização de cada território, umas medidas ou outras têm de ser implantadas, no que respeita ao modo de operar. Em Portugal, há municípios onde o abastecimento de água gerido diretamente ou por empresas municipais, noutros por empresas de capital misto (estado + municípios), e há outros onde o abastecimento é concessionado a empresas privadas, sendo os resultados bem diferentes.

Relativamente ao estabelecimento das zonas de medição e controlo (ZMC), é importante assegurar que todas as tubagens para dentro e fora dessas zonas estão fechadas ou tem instalados medidores de caudais. Por conseguinte, deve ser aplicado um teste de pressão zero para verificar se a ZMC está isolada hidraulicamente, ou não. O teste é realizado fechando todas as válvulas de entrada e saída na ZMC e, depois, verificando se a pressão cai para zero

ao fim de algum tempo. Se a pressão não cair a zero, então existe uma ou mais condutas não identificadas que continuam a permitir a entrada de água na ZMC.

Uma vez estabelecida a zona de medição e controlo (ZMC), o quadro do balanço hídrico exigido pelas autoridades regulatórias das perdas de água deve ser preparado para um dado intervalo de tempo, geralmente um ano. Por exemplo, o volume das perdas totais de água (aparentes + reais) é calculado pela diferença entre o volume de água entrada no sistema (AES) (i.e., a ZMC) e o volume do consumo autorizado (CA) (na ZMC). O fluxo total pode ser determinado com o(s) medidor(es) de caudal instalado(s) na(s) conduta(s) de entrada na ZMC e, também, na(s) de saída, se existir(em). O CA é obtido pela soma de todas as leituras dos contadores dos clientes da zona, assumindo que são todos medidos (como exigido pelo regulamento). É essencial estabelecer um registo de todos os clientes de água na ZMC, a fim de calcular o consumo total de água com precisão.

A divisão de uma rede em várias zonas de medição e controlo (ZMC) cria muitos pontos “fim de rede” e altera as características hidráulicas e de qualidade da água da rede. A distribuição de pressões, a velocidade do escoamento nas tubagens e a concentração de cloro residual na água podem mudar consideravelmente. Por conseguinte, deve ser utilizado um modelo hidráulico e de qualidade da água para prever as alterações resultantes da divisão da rede em ZMC's. Assim, a modelação hidráulica e da qualidade da água ajuda a escolher a melhor configuração das ZMC's, i.e., a que produz os menores inconvenientes.

Se todos os consumos autorizados pelos utilizadores forem medidos (como requerido pela regulação das perdas de água), o quadro do balanço hídrico será simplificado e todos as componentes do consumo autorizado serão determinadas com base em medições e não em estimativas. Na prática, muitas empresas de serviços de água enfrentam a dificuldade de estimar componentes não medidas do consumo de água (faturado ou não faturado). Este problema pode ser resolvido através da instalação de contadores de água a todos os utilizadores e a realização de medições frequentes. No entanto, a conversão de todos os consumos não medidos a consumos medidos podem demorar algum tempo e em alguns casos, isto pode prolongar-se por anos. O progresso neste aspeto deve ser registado e controlado pelas instituições responsáveis. Algumas empresas não têm recursos financeiros suficientes para melhorar as suas infraestruturas hidráulicas, mas, em muitos casos, o investimento seria devolvido em benefício.

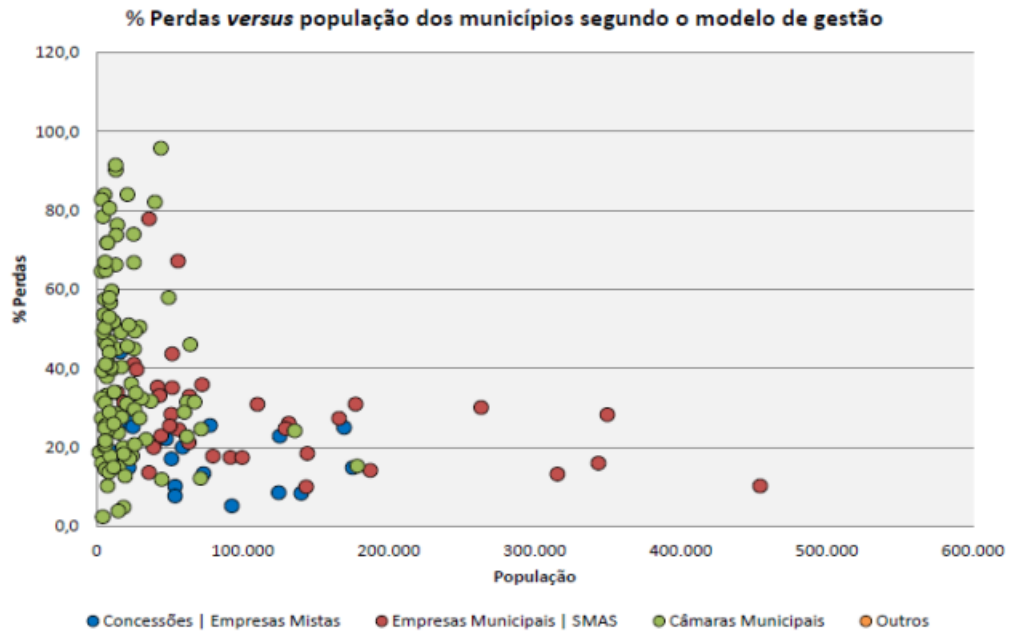


Figura 17. Percentagem de ANF respeito a AES nos sistemas em baixa

Como comentado no início deste subcapítulo, a **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** mostra diferenças substanciais entre os resultados obtidos em Portugal pelos diferentes tipos de gestão do abastecimento de água “em baixa”. As empresas municipais tendem a ter maiores percentagens de perdas nas suas redes, ainda que também seja verdade que são, geralmente, sistemas mais pequenos, o que pode ter repercussão nos resultados operacionais. Em muitos casos este problema persiste por não haver reclamações sobre o assunto. Há muito consumo ilegal, que é difícil de detetar, e não é fácil substituir parte do sistema quando este requer renovação. Por outro lado, deixar sem abastecimento famílias que não pagam a água consumida é um tema delicado. Por tudo isto, os gestores podem atribuir à falta de recursos a justificação para a manutenção de um nível elevado de perdas.

Não sendo um problema com uma fácil solução, tem de ser abordado da melhor forma possível. Em Portugal, em 2018, foram desperdiçados quase 180 milhões de metros cúbicos de água (contabilizando diferentes usos), o que repercute em aproximadamente 90 milhões de euros a nível económico. Com estas cifras na mão, a ninguém escapa que é um grande problema económico, ecológico e social, que teria numerosos benefícios se fosse resolvido.

Portanto, são diversas e de muito peso as razões para tentar reduzir as perdas de água, às quais podem agregar-se as seguintes:

- Desperdiçar água é algo negativo que não faz sentido;
- Os motivos ecológicos, económicos e sociais, acima mencionados;
- Os governos encarregados de atribuir subsídios e empréstimos exigem, previamente, uma diminuição da ANF;

- Como é lógico, as pessoas e os meios de comunicação social estão atentos a esta problemática;
- As tarifas da água poderiam baixar;
- A redução da ANF daria lugar a uma redução da despesa (de produção e/ou aquisição de água tratada) e a um aumento de receita (e.g., por redução das perdas aparentes). O seu efeito combinado contribuiria para financiar o combate às perdas e a melhoria da rede, ou seja, daria lugar a um processo que se retroalimentaria.

Algumas das outras causas pelas que não se consegue este objetivo são: uma falta de informação sobre a matéria, falta de recursos das entidades, não dar suficiente importância à água não faturada e não compreender bem as formas de reduzi-la.

3.2.3- Problemas a ser considerados

Nesta secção vão expor-se alguns dos problemas pontuais importantes a ser considerados e, pelos quais, tem uma grande importância uma adequada gestão da rede.

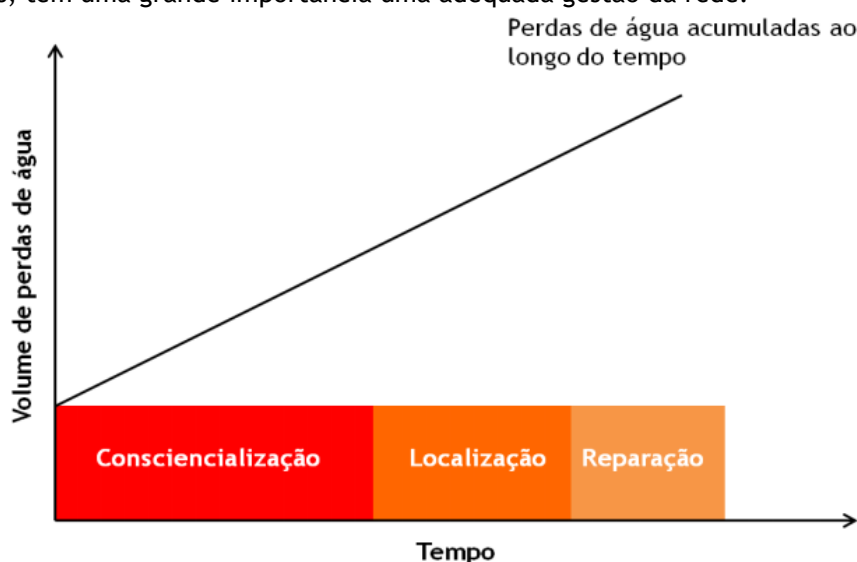


Figura 18. Perdas acumuladas no tempo

A **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** mostra as perdas acumuladas de água ao longo do tempo que, naturalmente, são cada vez em maior volume, pois os diferentes problemas vão-se acumulando e criando cada vez mais dificuldades.

Uma rotura grande e localizada gera um volume de perdas pequeno, pois a reparação é imediata, pelo que o problema não dura muito tempo. Uma avaria mais grave ocorre quando se dá uma rotura ou anomalia pequena ou invisível, que perdura muito tempo. Esta anomalia pode causar um problema persistente que é difícil de ser detetado e, por consequência, vai causar perdas muito maiores com o decorrer do tempo (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

Por outro lado, é importante manter um grande controlo da pressão na rede, pois oscilações desta gera variações na grandeza das fugas. Ainda que seja uma relação complexa

e difícil de quantificar, sabe-se que ao aumento da pressão na rede corresponde uma subida do caudal das perdas reais. Acresce que uma diminuição da pressão de água na rede e a redução da amplitude da oscilação desta grandeza ao longo de um dia produzem benefícios, nomeadamente um menor número de roturas e uma maior vida útil das tubagens.

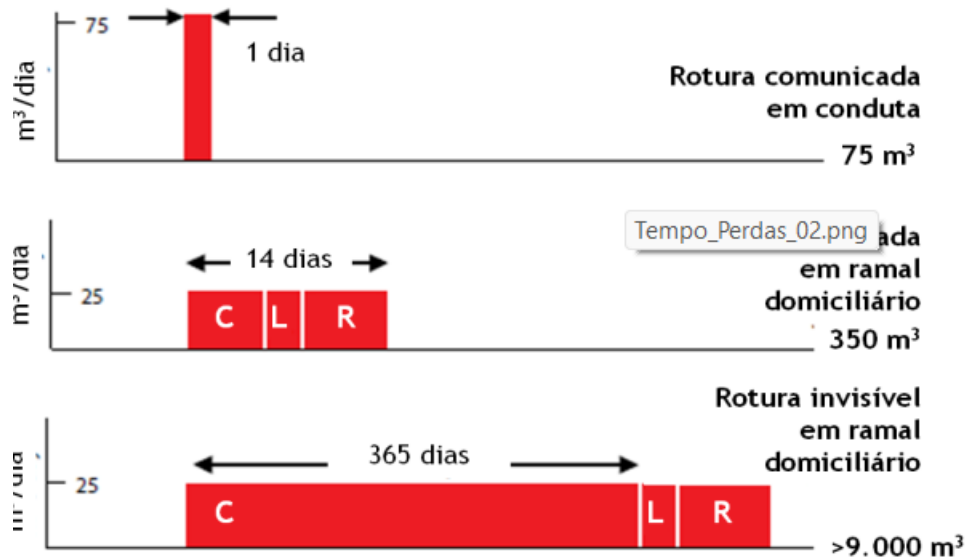


Figura 19. Duração de fugas e volume de perdas

Finalmente, a ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. mostra a relação entre pressão, consumo e perdas de água ao longo de um dia numa rede de abastecimento de água. Em particular, pode observar-se que os caudais máximos das perdas ocorrem nas horas de menor consumo a que, por razões de natureza hidráulica, correspondem as maiores pressões.

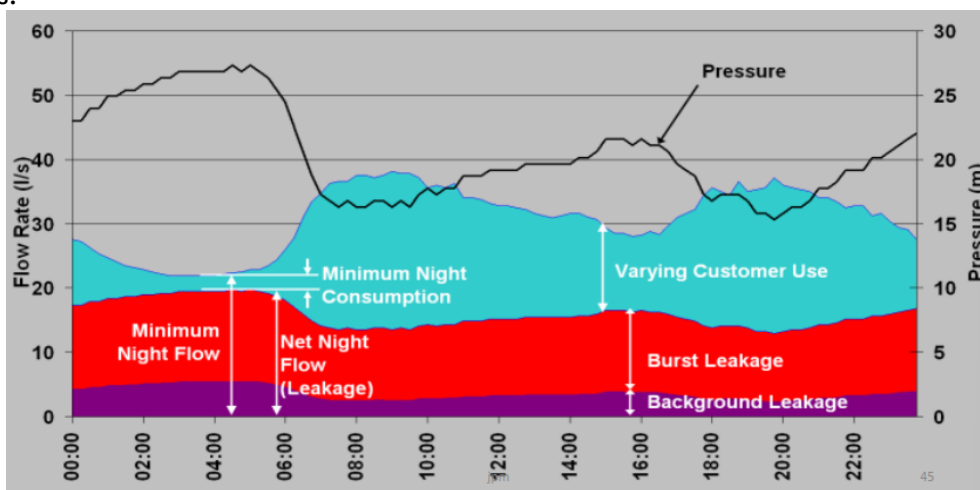


Figura 20. Pressão - Consumo - Perdas

Capítulo 4

Métodos e ferramentas

4.1- EPANET

Este capítulo tem como objetivo detalhar o software utilizado no decorrer da tese, assim com a ligação que tem com cada parte do sistema de abastecimento. Há também um programa geral, e bem conhecido por todos, como o Excel, e outros mais específicos da matéria, como é o EPANET.

Quando estamos a estudar a distribuição de água potável e, portanto, do dimensionamento e modelação de redes de tubagens (de forma geral em áreas urbanas), uma das ferramentas mais usadas para este fim é o software EPANET.

Este software é utilizado atualmente em muitas partes do mundo com a finalidade de modelar sistemas de abastecimento de água potável. Ao princípio, foi uma ferramenta desenvolvida para se ter uma forma de conhecer o movimento e o destino da água potável, sem sistemas de distribuição, mas pode ser utilizada em diferentes tipos de aplicações em sistemas de distribuição de água. Hoje em dia, os engenheiros e consultores usam o EPANET para desenhar e dimensionar novas infraestruturas hidráulicas, modelar e prever o comportamento das existentes, investigar problemas relacionados com a qualidade da água, otimizar operações em reservatórios e o bombeamento, reduzir o gasto energético e preparar os sistemas para possíveis emergências. Também pode ser usado para modelar ameaças por contaminação e avaliar a resiliência face a ameaças de segurança ou desastres naturais.

O EPANET é um programa do domínio publico, portanto, qualquer utilizador que quiser usá-lo, para comprovar resultados ou qualquer outro fim, tem acesso. O software EPANET foi desenvolvido em inglês e tem traduções para algumas versões como a versão espanhola (traduzida pelo Departamento de Ingeniería Hidráulica de la Universidad Politécnica de

Valencia) para a versão 2.0.12. No entanto, para este trabalho vai ser usada a versão de EPANET 2.2, só disponível em inglês.

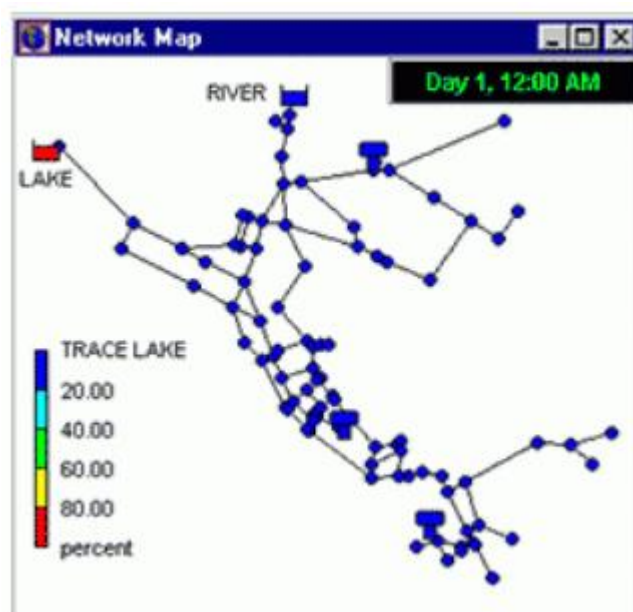


Figura 21. Exemplo de rede em EPANET [18]

A interface do utilizador do EPANET fornece um editor visual da rede que simplifica o processo de construção de modelos da rede de condutas e a edição das suas propriedades e dados. Várias ferramentas de relatório e visualização de dados e resultados são utilizadas para ajudar a interpretar os resultados de uma análise de rede, incluindo mapas de rede codificados por cores, tabelas de dados, utilização de energia, reação, calibração, gráficos de séries temporais, e gráficos de perfil e de contorno. São muitas as funcionalidades e possibilidades deste software, sendo algumas das mais importantes as seguintes:

- Não há um limite no tamanho do modelo;
- Caudais e pressões constantes ou variáveis;
- Cálculo de custos energéticos;
- Etc.

Tem também uma toolkit de funções externas utilizável por programas externos, a qual pode ser usada para o desenvolvimento de aplicações como a referida nesta tese.

4.1.1- Componentes da rede de abastecimento

Esta secção está dedicada à explicação da rede de abastecimento a às componentes que são necessárias para o desenvolvimento deste trabalho e, geralmente, em qualquer sistema de distribuição de água. Também os nomes das componentes vão ser traduzidos para inglês, pois é a língua na qual vai aparecer no EPANET (software que vai ser usado para o desenvolvimento da tese).

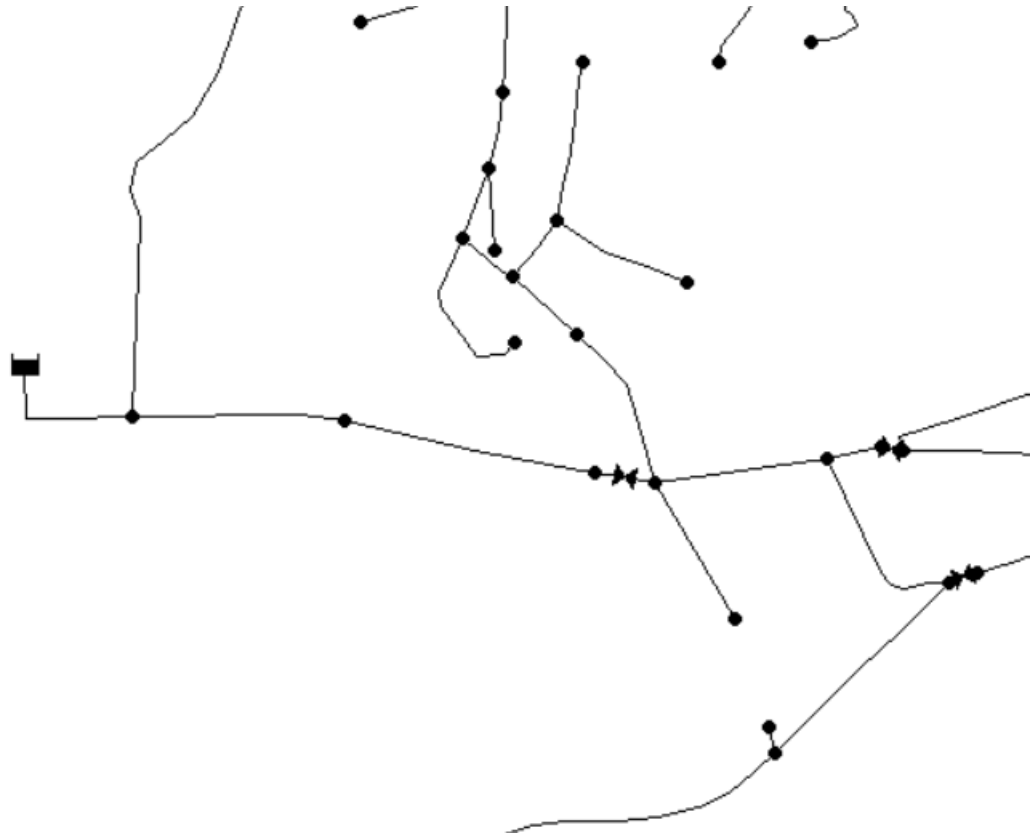


Figura 22. Parte dum modelo de rede em EPANET [18]

Como mostra a ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia., o modelo é muito simples e só com as componentes necessárias e básicas para se poder entender a rede. A união de todas estas componentes é o que vai garantir o correto funcionamento do sistema e, sem cada uma delas, não poderia ser assim. A finalidade desta rede é levar a água desde um ponto, que pode ser um reservatório ou um tanque de armazenamento, até o seu destino, neste caso as habitações e outros pontos de interesse urbano. De seguida são detalhadas as componentes normalmente usadas, à exceção de algumas componentes importantes, como poderiam ser os tanques e os meios de bombagem, os quais não são necessários neste trabalho devido à simplificação da rede para centrar-se no problema principal, que são as perdas reais de água.

- Um reservatório é um grande armazenamento de água que pode ser natural ou artificial (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.), e pode ser de muitos tipos e com características diferentes. No entanto, tendo em conta o objetivo principal desta dissertação, é o ponto onde está acumulada a água que é utilizada para abastecer a rede de distribuição de acordo com as necessidades dos consumidores.



Figura 23. Albufeira de Atazar em Madrid (Espanha) [1]

Na terminologia EPANET, em inglês, é designada por Reservoir e tem uma carga hidráulica constante, correspondente à cota da superfície livre da água (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.).

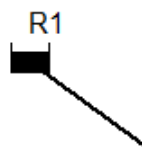


Figura 24. Reservatório de Nível Fixo (reservoir) do modelo EPANET [18]

- Outra parte importante da rede são as tubagens (pipes, em inglês), que conduzem a águas desde uma localização inicial ao seu destino. As tubagens podem ser de muitos materiais (PVC, PEAD, ferro fundido dúctil, etc.) e características diferentes, sendo parâmetros importantes, o comprimento, o diâmetro e a rugosidade.

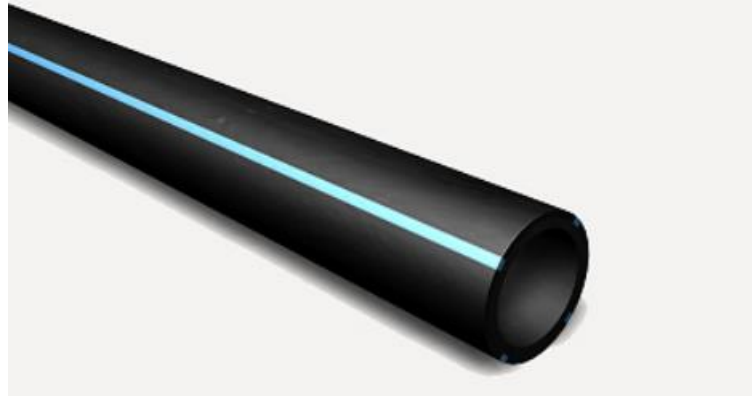


Figura 25. Tubo PEAD PE100 [20]

No software EPANET, a sua introdução é um pouco mais complexa que a do reservatório, já que tem muitos mais parâmetros a quantificar, como se pode ver na **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, onde três tubos se juntam num ponto (nó). Os parâmetros das tubagens são o nome, nós iniciais e finais, especificação da zona (opcional), comprimento, diâmetro, rugosidade, coeficiente de perda de carga, estado inicial, etc. O modo de representação gráfica em EPANET é o que se pode ver na imagem mencionada (sendo as três linhas que aparecem cada uma delas).

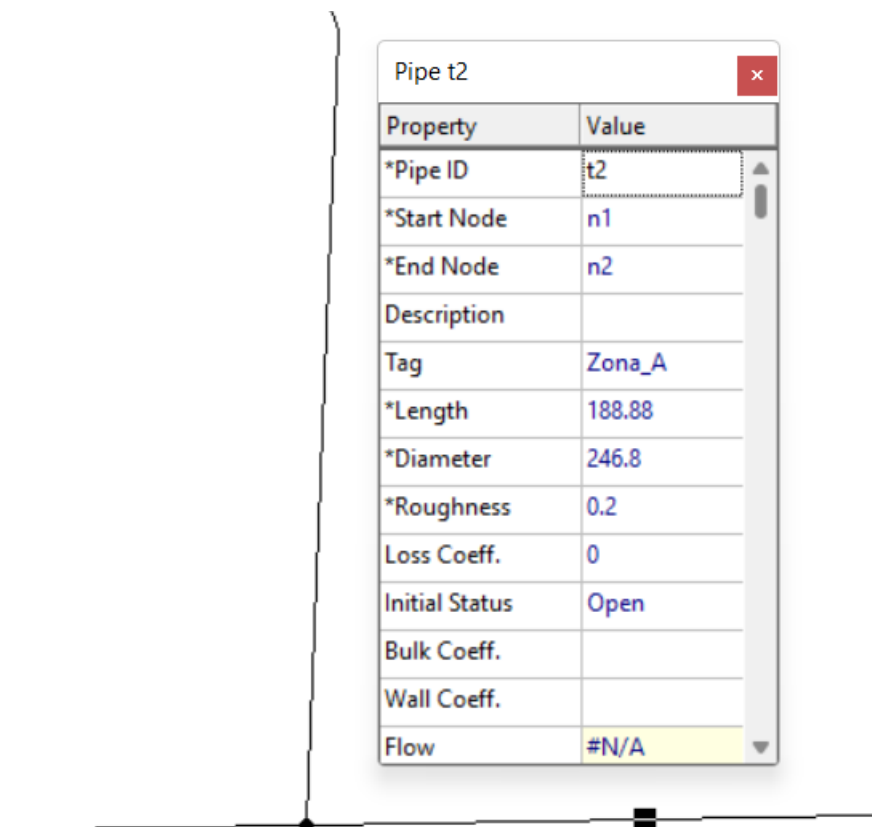


Figura 26. Exemplo de união de tubos num nó de EPANET

- Outra das partes principais na rede de abastecimento e, em particular, no EPANET, são os nós (denominados junctions em inglês, no programa). Um nó é um ponto de união entre duas ou mais tubagens (ou, também, um nó pode representar uma mudança das características de um tubo). No software, os nós são representados por pontos e, na realidade, podem ser diversos acessórios, dependendo da sua função. Por exemplo, na **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** pode ver-se um T para união de três tubagens, de polietileno e diferentes diâmetros para cada ligação.



Figura 27. Acessório T para união de 3 tubos [20]

Os nós do modelo EPANET têm uma importância particular já que, para caracterizá-los quase que só é necessária uma cota topográfica (elevation, no EPANET), mas têm associados também um consumo base (base demand, no EPANET). O símbolo usado em EPANET é um simples ponto (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

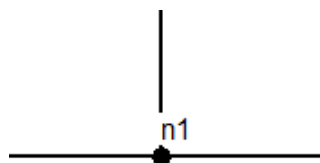


Figura 28. Nó (junction) do modelo EPANET

- Para terminar com as componentes das redes, sendo também importante ainda que não com tanta relevância como as partes anteriores, têm-se as válvulas (valves, no EPANET). As válvulas podem ser elementos reguladores da pressão, sem os quais a rede não poderia funcionar de forma correta. Servem para regular a pressão da água em diferentes locais da rede, podendo inclusivamente fechar totalmente a passagem da água se for necessário para realizar uma reparação ou por qualquer outro motivo.



Figura 29.Exemplo de válvula borboleta (a simular por uma Throttle Control Valve) [20]

A pressão é um dos parâmetros mais importantes na hora de dimensionar uma rede e desta vão depender muitas outras variáveis e possíveis problemas ou benefícios para a rede. Como já se referiu, pressões elevadas poderão traduzir-se num excesso do volume de perdas reais de água no sistema. No EPANET, as válvulas são consideradas links do modelo (como os tubos e as bombas) e são caracterizadas por poucos parâmetros, como o tipo, o diâmetro e o estado. No EPANET, aparece como na ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..

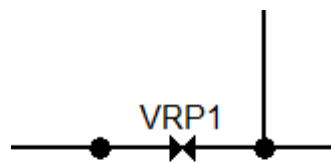


Figura 30. Válvula redutora de pressão (Pressure Reducing Valve) no EPANET

4.1.2- Objetivo do uso do EPANET

O uso do EPANET nesta tese está focado na modelação e calibração das perdas de água mediante o apoio de outras aplicações, o Microsoft Excel ou o Matlab. O EPANET vai permitir modelar a rede, com todas as suas características, dimensões e parâmetros necessários, e vai ser essencial para modelar as perdas de água em primeira instância. Depois, com o apoio de outros programas (Excel ou Matlab), vai ser necessário calibrar estas perdas num processo iterativo que vai ser explicado adiante de forma mais detalhada.

4.2- Microsoft Excel

Outro dos programas necessários para levar a cabo o presente trabalho é o Microsoft Excel, conhecido pela maioríssima parte dos utilizadores e que tem diversas funções e aplicações para diferentes campos. Neste caso vai ser ferramenta de apoio para, com os resultados obtidos pelo EPANET, realizar uma série de iterações que permitam calibrar as perdas reais de água numa forma mais aproximada à realidade.

4.3- MATLAB

Um software desenvolvido em MATLAB pode ser utilizado para a realização mais rápida das mesmas tarefas acima descritas para o Excel. Para o efeito, o programa comunica com o simulador EPANET e comanda a execução de simulações através do respetivo toolkit de funções externas. Deste modo, podem ser ajustados parâmetros do modelo e realizados os procedimentos iterativos para a calibração das perdas ou para a determinação dos fatores horários do consumo doméstico.

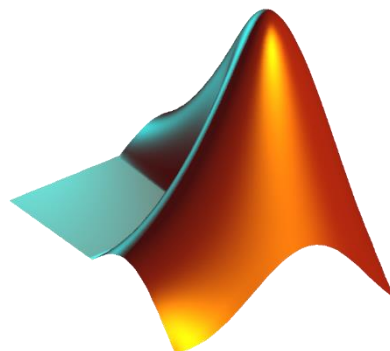


Figura 31. Logo MATLAB

O MATLAB é um sistema informático de cálculo numérico com uma interface de desenvolvimento integrado e com uma linguagem de programação própria (linguagem M). Tem sido desenvolvido pela Mathworks e é uma excelente ferramenta para manipular matrizes, elaborar algoritmos e muitas outras utilizações matemáticas. Desde a sua implementação em 1984, tem evoluído até ser um dos programas mais utilizados por engenheiros. A língua empregada neste programa é o inglês (o mesmo que ocorre com o EPANET), pelo que as partes correspondentes a partes próprias do programa serão apresentadas nesta língua.

Capítulo 5

Modelação e calibração de rede

Neste capítulo vai analisar-se o objetivo principal da tese, que é a modelação e calibração de perdas reais de água numa rede de abastecimento de água potável.

Como em muitos outros campos da tecnologia, na engenharia têm sido usados programas informáticos para aumentar a rapidez dos cálculos e assim otimizar tempo e dinheiro. No caso dos sistemas de abastecimento de água, os modelos de simulação são um tipo de ferramenta que servem para prever o movimento hidráulico e as características da água no sistema a estudar (pode ser a elaboração dum sistema novo ou a análise de um já existente). Portanto, agora já não é necessário fazer todos os cálculos matemáticos de forma manual, sendo que o programa (neste caso o EPANET) pode fazê-lo se todos os dados forem conhecidos. Cabe acentuar que é importante um grande conhecimento na matéria para poder interpretar os resultados de forma adequada. O mesmo ocorre com a calibração do modelo, uma vez feita. O processo iterativo é um trabalho custoso e entediante que antes tinha de ser feito de modo manual, e nalguns casos poderia não ser rentável. Agora, com os recursos que estão ao nosso alcance, pode otimizar-se enormemente o esforço de cálculo.

5.1- Obtenção dos dados de partida

Em geral, no estudo de uma rede de abastecimento de água, ou se está a dimensionar uma rede nova ou elaborar um modelo de uma rede existente. Neste caso, para abordar o problema deste trabalho, foi considerada uma rede de distribuição idêntica a uma existente e

fornecida num exercício da matéria Sistemas de Abastecimento de Águas, do Mestrado em Engenharia Civil do FEUP.

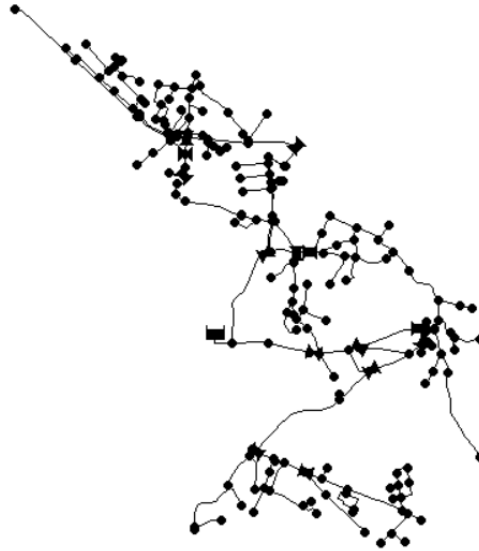


Figura 32, Modelo EPANET da rede de abastecimento a estudar

A ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. mostra a rede que vai ser estudada neste trabalho. Esta rede está formada por 1 reservatório de armazenamento de nível fixo (reservoir), 211 tubagens de diferentes características, 208 nós que unem estes tubos e 14 válvulas reguladoras de pressão. São conhecidos o traçado da rede e os diâmetros das condutas, assim como a regulação das válvulas mencionadas. Também são conhecidos os consumos domésticos e industriais médios e a respetiva distribuição espacial, assim como as medições horárias de volumes entregues à rede pelo reservatório. Os dados numéricos iniciais da rede de distribuição de água são os seguintes:

- A rede fornece água a 8640 clientes (os clientes correspondem aos contadores e não ao número de habitantes; normalmente é considerado que em Portugal moram aproximadamente 2,5 pessoas por habitação);
- A rede dispõe de 2850 ramais de ligação predial na Zona A e de 606 na zona B;
- Os comprimentos médios destes ramais são de 12 metros na primeira zona e de 8 metros na segunda;
- O consumo doméstico mínimo noturno mínimo é estimado em 2 litros por hora e por contador (2 L/h/contador);
- O valor admitido para o expoente da lei de vazão dos dispositivos emissores nos nós da rede é de 1,15 (este valor corresponde-se a uma cifra teórica para o correto funcionamento da fórmula da lei de vazão, a qual vai ser explicada adiante);

- O valor médio do caudal total do consumo doméstico distribuído pelos nós da rede é de 30 L/s.
- O valor médio do caudal total industrial é de 5 L/s.
- Os caudais médios horários (em L/s) fornecidos à rede de abastecimento de água pelo reservatório são os seguintes (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.):

Horas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Q (l/s)	25.99	18.62	16.92	16.05	16.92	21.73	41.37	51.66	59.35	61.22	62.32	64.31

Horas	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Q (l/s)	66.54	67.1	62.32	55.49	54.39	54.39	52.94	73.36	66.03	58.46	48.71	42.44

Tabela 3. Caudais médios horários fornecidos à rede

- Alguns outros dados estão inseridos no modelo EPANET da rede e são muito variados (e.g., o comprimento das tubagens, a cota topográfica dos nós, etc.). Portanto vão ser mostrados em forma de tabelas (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. e ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.), extraídas do EPANET (onde junction é nó, demand é consumo (em L/s), pattern é padrão, pipe é tubo e diameter é diâmetro).

Junction	Demand	Pattern
n1	0.2144	
n2	0.1078	
n3	0.2542	
n4	0.3524	
n5	0.0178	
n6	0.2758	
n7	0.3981	
n8	0.2429	
n9	0.0000	
n10	0.0000	
n11	0.0416	
n12	0.0000	
n13	0.4906	
n14	0.2924	
n15	0.3041	
n16	0.0654	
n17	0.1235	
n18	0.0376	
n19	0.0037	
n20	0.3016	
n21	0.1948	

<i>Junction</i>	<i>Demand</i>	<i>Pattern</i>
n22	0.1474	
n23	0.0349	
n24	0.1720	
n25	0.1917	
n26	0.1301	
n27	0.0250	
n28	0.0541	
n29	0.1028	
n30	0.1205	
n31	0.0159	
n32	0.1932	
n33	0.2289	
n34	0.2724	
n35	0.4920	
n36	0.4934	
n37	0.0210	
n38	0.2245	
n39	0.2835	
n40	0.0968	
n41	0.2877	
n42	0.0652	
n43	0.0635	
n44	0.3011	
n45	0.0375	
n46	0.2776	
n47	0.0762	
n48	0.2596	
n49	0.2134	
n50	0.2300	
n51	0.0701	
n52	0.0473	
n53	0.1339	
n54	0.0745	
n55	0.0856	
n56	0.1185	
n57	0.0540	
n58	0.0340	
n59	0.2018	
n60	0.1034	
n61	0.0046	
n62	0.1487	
n63	0.0920	
n64	0.0394	
n65	0.0925	
n66	0.0647	

<i>Junction</i>	<i>Demand</i>	<i>Pattern</i>
n67	0.0346	
n68	0.0782	
n69	0.0341	
n70	0.0345	
n71	0.1533	
n72	0.0633	
n73	0.0171	
n74	0.0304	
n75	0.0197	
n76	0.0674	
n77	0.2410	
n78	0.3878	
n79	0.2118	
n80	0.0983	
n81	0.1499	
n82	0.1863	
n83	0.0566	
n84	0.2151	
n85	0.1205	
n86	0.1507	
n87	0.3023	
n88	0.1636	
n89	0.0901	
n90	0.1314	
n91	0.1671	
n92	0.1479	
n93	0.3067	
n94	0.1408	
n95	0.0428	
n96	0.0792	
n97	0.1280	
n98	0.1488	
n99	0.2433	
n100	0.1699	
n101	0.0866	
n102	0.1920	
n103	0.2100	
n104	0.0891	
n105	0.1269	
n106	0.2497	
n107	0.1204	
n108	0.2684	
n109	0.1404	
n110	0.1475	
n111	0.1347	
n112	0.0630	

<i>Junction</i>	<i>Demand</i>	<i>Pattern</i>
n113	0.3947	
n114	0.2484	
n115	0.5072	
n116	0.2590	
n117	0.1501	
n118	0.1115	
n119	0.0701	
n120	0.1028	
n121	0.0014	
n122	0.0710	
n123	0.0992	
n124	0.0525	
n125	0.0770	
n126	0.0391	
n127	0.1043	
n128	0.0641	
n129	0.1038	
n130	0.1740	
n131	0.0401	
n132	0.1823	
n133	0.1391	
n134	0.4901	
n135	0.6673	
n135	2.22	fh_ind
n136	0.3294	
n137	0.1243	
n138	0.0607	
n138	0.56	fh_ind
n139	0.2320	
n140	0.2040	
n141	0.1381	
n141	0.55	fh_ind
n142	0.0558	
n143	0.0258	
n144	0.0132	
n144	0.56	fh_ind
n145	0.0013	
n146	0.2300	
n147	0.2193	
n148	0.0201	
n149	0.2130	
n150	0.0337	
n151	0.0792	
n152	0.2285	
n153	0.2857	

<i>Junction</i>	<i>Demand</i>	<i>Pattern</i>
n154	0.2312	
n155	0.1319	
n156	0.0681	
n157	0.2041	
n158	0.3905	
n159	0.1309	
n160	0.1205	
n161	0.2195	
n162	0.0883	
n163	0.1820	
n164	0.4168	
n165	0.1923	
n166	0.1213	
n167	0.0114	
n168	0.3537	
n169	0.1462	
n170	0.3060	
n171	0.1852	
n172	0.1272	
n173	0.1256	
n174	0.0729	
n175	0.0721	
n176	0.1381	
n177	0.0852	
n178	0.1381	
n179	0.0292	
n180	0.0581	
n181	0.3971	
n182	0.0283	
n183	0.1962	
n183	1.11	fh_ind
n184	0.1994	
n185	0.0576	
n186	0.2358	
n187	0.1047	
n188	0.0453	
n189	0.1060	
n190	0.0012	
n191	0.0000	
n192	0.0000	
n193	0.0000	
n194	0.0000	
na1	0.0818	
na3	0.0771	
na4	0.0183	
na5	0.2144	

<i>Junction</i>	<i>Demand</i>	<i>Pattern</i>
na6	0.1078	
na7	0.0428	
na8	0.0198	
na9	0.2680	
na10	0.0536	
na11	0.0174	
na12	0.0591	
na2	0.0421	
nh1	0.0000	

Tabela 4. Consumos dos nós na rede

<i>Pipe</i>	<i>Diameter</i>
t1	352.6
t2	246.8
t3	246.8
t4	246.8
t5	79.2
t6	220.4
t7	123.4
t8	79.2
t9	79.2
t10	198.2
t11	79.2
t12	198.2
t13	79.2
t14	96.8
t15	79.2
t16	79.2
t17	79.2
t18	79.2
t19	79.2
t20	79.2
t21	176.2
t22	79.2
t23	79.2
t24	176.2
t25	79.2
t26	79.2
t27	79.2
t28	79.2
t29	79.2
t30	158.6
t31	158.6
t32	79.2

<i>Pipe</i>	<i>Diameter</i>
t33	79.2
t34	79.2
t35	79.2
t36	158.6
t37	96.8
t38	79.2
t39	79.2
t40	79.2
t41	123.4
t42	79.2
t43	79.2
t44	79.2
t45	79.2
t46	79.2
t47	110.2
t48	79.2
t49	79.2
t50	79.2
t51	79.2
t52	79.2
t53	79.2
t54	79.2
t55	96.8
t56	79.2
t57	79.2
t58	79.2
t59	79.2
t60	79.2
t61	79.2
t62	79.2
t63	79.2
t64	79.2
t65	79.2
t66	79.2
t67	79.2
t68	79.2
t69	79.2
t70	79.2
t71	79.2
t72	79.2
t73	79.2
t74	79.2
t75	79.2
t76	79.2
t77	79.2

<i>Pipe</i>	<i>Diameter</i>
t78	79.2
t79	79.2
t80	79.2
t81	79.2
t82	79.2
t83	312.8
t84	198.2
t85	141
t86	79.2
t87	79.2
t88	79.2
t89	79.2
t90	79.2
t91	79.2
t92	79.2
t93	79.2
t94	79.2
t95	79.2
t96	79.2
t97	110.2
t98	123.4
t99	110.2
t100	79.2
t101	79.2
t102	79.2
t103	79.2
t104	79.2
t105	79.2
t106	79.2
t107	79.2
t108	79.2
t109	79.2
t110	79.2
t111	79.2
t112	79.2
t113	79.2
t114	246.8
t115	158.6
t116	123.4
t117	110.2
t118	79.2
t119	96.8
t120	96.8
t121	123.4
t122	79.2

<i>Pipe</i>	<i>Diameter</i>
t123	123.4
t124	79.2
t125	79.2
t126	79.2
t127	110.2
t128	79.2
t129	96.8
t130	79.2
t131	79.2
t132	277.6
t133	246.8
t134	79.2
t135	79.2
t136	246.8
t137	246.8
t138	246.8
t139	246.8
t140	79.2
t141	246.8
t142	246.8
t143	79.2
t144	79.2
t145	198.2
t146	246.8
t147	79.2
t148	79.2
t149	176.2
t150	176.2
t151	79.2
t152	141
t153	79.2
t154	123.4
t155	96.8
t156	79.2
t157	79.2
t158	79.2
t159	79.2
t160	79.2
t161	79.2
t162	79.2
t163	79.2
t164	79.2
t165	79.2
t166	79.2
t167	79.2

<i>Pipe</i>	<i>Diameter</i>
t168	79.2
t169	158.6
t170	123.4
t171	110.2
t172	79.2
t173	96.8
t174	96.8
t175	79.2
t176	79.2
t177	79.2
t178	79.2
t179	79.2
t180	123.4
t181	79.2
t182	79.2
t183	79.2
t184	96.8
t185	79.2
t186	79.2
t187	79.2
t188	79.2
t189	79.2
t190	79.2
t191	79.2
t192	123.4
t193	79.2
t194	79.2
t195	79.2
t196	79.2
t197	79.2
t198	96.8
t199	96.8
t200	79.2
t201	79.2
t202	96.8
t203	246.8
t204	246.8
t205	96.8
t206	123.4
t207	79.2
t208	79.2
t209	79.2
t210	79.2
th1	79.2

Tabela 5. Diâmetros das condutas

5.2- Conceitos teóricos e metodologia de trabalho

Para a correta modelação dum sistema de abastecimento de água é necessário ter toda a informação de esta disponível, ou a maior quantidade possível (localização dos elementos em questão, dimensões, características dos elementos, etc.) e dos consumos que os utilizadores precisam ou vão precisar (bem definidos no espaço e no tempo, com as suas variações). Como tem sido referido, as perdas reais de água potável formam parte do consumo, embora não desejadas, e tem de ser consideradas, já que normalmente são uma parcela importante do caudal total a entregar à rede e, ademais, a sua consideração permite a análise de outros problemas (o estudo destas perdas, e da relação com a pressão, é da maior utilidade na melhoria continua do funcionamento da rede de abastecimento).

Já foi visto que as causas das perdas podem ser muito diferentes em cada caso (roturas, erros de execução, etc.), mas normalmente são por causas em princípio desconhecidas, impercetíveis, com perdas lentas e difícil de detetar a curto prazo se não houver um controlo ativo sobre estas. Nestes casos, a água sai por pequenas fraturas ou fissuras nas tubagens, nos nós ou nas válvulas, gerando pequenas fugas que não apresentam evidência à superfície e, por isso, muito difíceis de detetar. Isto é o que vai ser modelado no software EPANET, através de uma adequada configuração dos nós (junctions) das redes como dispositivos emissores, com uma lei de vazão que procura aproximar o comportamento das fugas de água (ou seja, das perdas). Então, o objetivo é que o programa informático seja uma representação do caudal de água que se está a perder, assim como, também, da sua localização no espaço. Além disso, tem de se simular o caudal de entrada no sistema (a rede de distribuição) e a variabilidade de caudais que vai haver ocorrer.

Em resumo, a metodologia de trabalho para esta tese vai ser aqui explicada. Para este fim, os nós do modelo EPANET vão desempenhar a função de dispositivos emissores de caudal, com uma lei de vazão adequadamente definida, tendo em conta o caudal total que entra no sistema de abastecimento de água e, simultaneamente, estimando o consumo efetivo total (tanto o doméstico como o industrial).

5.2.1- Nós emissores

Para realizar a correta aproximação das perdas em base aos nós da rede, vão ser usadas uma serie de fórmulas desenvolvidas para este campo da hidráulica e que são de uso habitual na matéria de abastecimento de água. Esta primeira fórmula, que, em cada nó, relaciona o caudal “perdido” com a pressão é a “lei de vazão” do respectivo dispositivo emissor (emitter), que segue a Figura 33.



As perdas de água que ocorrem ao longo das condutas são atribuídas aos nós do modelo, sendo que o caudal perdido em cada nó deve corresponder às perdas nos semi-comprimentos das condutas que concorrem para cada nó (ver figura que acompanha a **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Assim, a lei de vazão de cada nó emissor deve ter em conta os semi-comprimentos das condutas e, também, a maior ou menor propensão de cada uma delas para perder água em idênticas condições de pressão. A lei de vazão do nó emissor é caracterizada pelas variáveis e parâmetros a seguir indicados:

- Q_i : caudal de perdas no nó “i” (expressa no EPANET em L/s, se for esta a unidade de medida adotada para o caudal);
- p_i : altura piezométrica no nó “i” (expressa no EPANET em m.c.a);
- C_i : coeficiente de vazão do nó “i”.
- B : expoente a que é elevada a pressão e que, no caso das perdas de água, se admite tome valores entre 1 e 1,2 (neste trabalho adotou-se o valor habitual de 1.15).

Portanto, é necessário analisar bem cada nó e ter em conta alguns dados, como os semi-comprimentos das condutas a que está ligado e a tendência destas à perda de água para um cenário de pressão similar. Estes aspetos estão representados na fórmula do coeficiente de vazão (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

$$C_i = c \sum_{j=1}^{M_i} 0.5 \text{ } c_{ppj} L_{j,i}$$

Figura 34. Coeficiente de vazão do nó i

Os parâmetros desta expressão são os seguintes:

- c : coeficiente de vazão de perdas unitário, i.e., por unidade de comprimento na conduta (no EPANET, em l/s/mB/m);
- c_{ppj} : coeficiente de ponderação de perdas de água do tubo “j” (é um parâmetro adimensional);
- $L_{j,i}$: comprimento do tubo “j” ligado ao nó “i” (no EPANET, em m); na expressão, a multiplicação por 0.5 destina-se a considerar somente a metade do comprimento;
- M_i : número de tubos ligados ao nó “i”.

Ou seja, o coeficiente de vazão de um nó, C_i , é definido pelo produto do coeficiente de vazão de perdas unitário, c , pelo somatório dos semi-comprimentos ponderados (pelos respectivos coeficientes c_{ppj}) das condutas que concorrem para o nó. O coeficiente de vazão de perdas unitário, c , deve considerar-se como uma abstração teórica correspondente à existência de um orifício contínuo ao longo de uma geratriz de cada conduta - que obviamente não existe -, mas que perdesse água em caudal idêntico ao das fugas pontuais existentes ao longo da mesma conduta. O produto deste coeficiente unitário, comum a todas as tubagens da rede, pelo coeficiente de ponderação de perdas, c_{pp} , de uma conduta concreta, define o coeficiente de vazão por unidade de comprimento dessa conduta que, sendo multiplicada pelo respetivo semi-comprimento, define a contribuição dessa conduta para o coeficiente de vazão do nó a que está ligada. Assim, somando as contribuições de todos os tubos ligados ao nó, se chega à **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Uma vez compreendido o significado coeficiente de vazão de perdas unitário, c , segue-se a explicação da sua obtenção. Para tal há que introduzir novos conceitos, que são o coeficiente de vazão global e o comprimento total ponderado da rede e, ainda, a pressão média ponderada relativamente à totalidade da rede de distribuição.

O coeficiente de vazão global da rede (C_{rede}) não é mais que o somatório de todos os coeficientes de vazão de todos os nós emissores “NN” da rede (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

$$C_{rede} = \sum_{i=1}^{NN} C_i$$

Figura 35. Coeficiente de vazão global da rede

Substituindo a **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** na **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** obtém-se a **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** na qual consta o comprimento total ponderado da rede ($L_{pond, rede}$) como sendo o somatório dos comprimentos ponderados de cada conduta da rede de abastecimento (M_T é o número total de tubos na rede de distribuição).

$$C_{rede} = \sum_{i=1}^{NN} C_i = c \sum_{i=1}^{NN} \sum_{j=1}^{M_i} 0.5 c_{ppj} L_{j,i} = c \sum_{j=1}^{M_T} c_{ppj} L_j = c L_{pond, rede}$$

Figura 36. Coeficiente de vazão global da rede

E, assim, obtém-se uma relação, simples e útil, do coeficiente global de vazão com coeficiente de vazão de perdas unitário e o comprimento total ponderado.

A **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** apresenta a fórmula para calcular as perdas de água para um nó emissor. Somando os caudais de perdas em todos os nós da

rede, obtém-se o caudal total das perdas de água da rede de abastecimento (Figura 37 ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.).

$$Q_{\text{perdas}} = \sum_{i=1}^{NN} C_i p_i^\beta = C_{\text{rede}} \langle p \rangle^\beta = c L_{\text{pond, rede}} \langle p \rangle^\beta$$

Figura 37. Caudal total de perdas

O caudal total de perdas (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.) e poderia ser definido como a quantidade de água que se está a perder por uma fuga global, para fazer uma simplificação, já que o coeficiente de vazão da rede está relacionado com a pressão média ponderada da rede.

Neste trabalho, como já se referiu, são conhecidos os comprimentos das condutas. Adiante é explicado como podem ser obtidos os coeficientes de ponderação de perdas de água das condutas (cpp). Sendo estes conhecidos, da obtenção do coeficiente de vazão das perdas unitário por unidade de comprimento na conduta, c , depende a modelação das fugas de águas nos orifícios.

Para obter o valor de “ c ” é necessário um processo de cálculo iterativo utilizando a fórmula do caudal de perdas (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.). A primeira aproximação, c_1 , é obtida com a fórmula da ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia., na qual se introduz o caudal de perdas pretendido, Q_{perdas} , e uma pressão média ponderada arbitrada, $\langle p_1 \rangle$.

$$c_1 = \frac{Q_{\text{perdas}}}{L_{\text{pond, rede}} \langle p_1 \rangle^\beta}$$

Figura 38. Início do processo iterativo

Com o valor de c_1 obtido nesta fórmula, pode quantificar-se os coeficientes de vazão dos NN nós emissores, que depois vão ter de ser inseridos no programa EPANET.

Depois da primeira simulação, vai se obter o caudal de perdas $Q_{\text{perdas},1}$, calculado pela diferença entre o caudal fornecido ao sistema pelo reservatório e o caudal doméstico e industrial efetivamente consumido, para as condições fixadas neste primeiro cálculo para o caudal de perdas (a explicar adiante). Nas seguintes iterações, a pressão ponderada do sistema tem de ser estimada com o caudal de perdas de água obtido na iteração anterior, ou seja, com a ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. (onde “ k ” corresponde ao número da iteração correspondente).

$$\langle p_k \rangle = \left(\frac{Q_{\text{perdas},k-1}}{c_{k-1} L_{\text{pond,rede}}} \right)^{\frac{1}{\beta}}$$

Figura 39. Altura piezométrica média ponderada

Com esta nova pressão, volta-se a calcular o coeficiente de perdas unitário da iteração “k” seguinte, para o caudal de perdas pretendido (fórmula da Figura 40).

$$c_k = \frac{Q_{\text{perdas}}}{L_{\text{pond,rede}} \langle p_k \rangle^{\beta}}$$

Figura 40. Coeficiente de perdas unitário para a iteração “k”

O procedimento iterativo termina quando o caudal de perdas calculado pelo EPANET ($Q_{\text{perdas},k}$) converge, a menos de um erro pré-definido, para o valor previamente estabelecido (Q_{perdas}). Isto se mostra na **referencia..**

$$|Q_{\text{perdas},k} - Q_{\text{perdas}}| < \delta$$

Figura 41. Fim do processo iterativo por convergência de caudais

Uma vez obtida a convergência, os nós emissores do modelo estão configurados para simular o funcionamento da rede de abastecimento para todos os possíveis cenários de consumo (i.e., variações dos consumos efetivos domésticos e industriais) que podem induzir oscilações nas pressões na rede e, portanto, variações das perdas de água.

O processo iterativo aqui explicado de forma sumária pode realizado por um programa MATLAB que controle externamente o simulador EPANET na obtenção dos resultados do sistema. Em particular, o simulador é utilizado no cálculo do caudal total fornecido à rede (QT) de cada vez que os coeficientes de vazão dos nós são reformulados, ação que vai preceder à obtenção do caudal de perdas de água ($Q_{\text{perdas},k}$) por diferença do caudal total fornecido para o consumo efetivo estimado.

O controlo externo do EPANET é efetuado com o auxílio de uma toolbox de funções escritas em MATLAB que comunica com o toolkit de funções externas do EPANET.

5.2.2- Ponderação das perdas nas condutas

Já foram explicados os procedimentos de modelação numérica para o cálculo das perdas de água, mas têm-se de quantificar os coeficientes de ponderação de perdas (cpp's) das tubagens, que vão servir para tentar medir corretamente a maior ou menor tendência de

cada tubo para perder água, por unidade de comprimento e para as mesmas condições de pressão.

Faltam alguns dados para aproximar como total precisão os coeficientes de ponderação de perdas de água dos tubos, por tanto, vai tomar-se o explicado pelo M. M. P. Figueiredo em 2012, que diz “Na ausência de melhor informação, sugere-se a adoção de uma fórmula de cálculo inspirada na que é preconizada para a quantificação do volume das perdas reais mínimas inevitáveis na definição do indicador de desempenho da International Water Association (IWA) para serviços de abastecimento de água (Alegre et al., 2004) designado por índice infraestrutural de fugas (Op29), em que $d_{ramal,j}$ representa a densidade de ramais da conduta j (em ramal/km), $\langle L_{ramal,j} \rangle$ o comprimento médio dos ramais de ligação da conduta j (em km) e MT o número total de condutas da rede de distribuição. Nos termos da Figura 42, quanto maior a densidade de ramais, ou o respetivo comprimento médio, maior a propensão para a perda de água por unidade de comprimento e por unidade de pressão”.

$$cpp = A + B d_{ramal} + C d_{ramal} \langle L_{ramal} \rangle$$

Figura 42. Quantificação expedita dos cpp's

As constantes presentes nesta equação tomam os seguintes valores:

- $A = 18$ litros por dia, por metro coluna de água e quilometro (l/d/mca/km);
- $B = 0.7$ litros por dia, por ramal e metro coluna de água (l/d/ramal/mca);
- $C = 25$ litros por dia, por ramal, por metro coluna de água e quilometro (l/d/ramal/mca/km).

Além das variáveis consideradas neste exercício, também tem de se ter em consideração muitos outros fatores para o correto e completo dimensionamento da rede, como as características físicas das tubagens, a locação dos trabalhos, o estado de conservação da rede (se existir), etc.

5.3- Aplicação da metodologia ao caso de estudo

Neste subcapítulo pretende-se modelar e calibrar a rede de abastecimento de água explicada no subcapítulo 5.1., com todos os dados que foram detalhados e com a metodologia comentada anteriormente.

5.3.1- Estimação e calibração de perdas manualmente (com apoio do Excel)

Para a modelação numérica das perdas de água na rede de abastecimento, parte-se dos caudais médios horários fornecidos à rede de distribuição (obtidos da ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.). Como já foi explicado, é necessário tomar o menor caudal fornecido à rede nas janelas horárias, que neste caso é o observado na quarta hora do

dia (o seja, desde as 3:00 às 4:00 horas da madrugada, o que é considerado como horário noturno em sistemas de abastecimento). Este consumo inclui o consumo doméstico, o consumo industrial (ou seja, grandes consumidores) e as perdas reais de água. O consumo mínimo noturno doméstico médio é estimado em 2 litros por hora e por contador, tendo-se considerado 8640 clientes (contadores) servidos pela rede.

$$Q_{dom,med,not,min} = \frac{Clientes * Consumo_{med.dom,not,min}}{3600 (s)}$$

Figura 43. Caudal doméstico médio noturno mínimo

Portanto, seguindo a equação anterior; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, e com os dados mencionados acima, obtém-se o resultado de $Q_{dom,med,not,min} = 4.8$ L/s. Já foi dito também que o consumo industrial médio diário é de 5 L/s, com um fator horário mínimo de 0.15, o que dá um resultado de 0.75 L/s. Estes dois valores, que totalizam 5.55 L/s, acrescidos aos das perdas, têm de somar o valor do caudal mínimo noturno que está sendo analisado (16.05 L/s). Deste modo, obtém-se o caudal máximo das perdas de água (ver **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

Valores pré-estabelecidos		
$Q_{perdas} =$	10.5	L/s
$Q_{cons} =$	5.55	L/s
valores calculados		
$Q_{total,Epanet} =$	16.05	L/s
$Q_{perdas} =$	10.5	L/s

Tabela 6. Caudal de perdas máximo

Como se comentou nos capítulos de análise da situação ambiental e económica, perder-se caudais da ordem de 10 L/s de água potável (i.e., 864 m³/dia), é totalmente inaceitável.

Tendo as perdas máximas noturnas (10.5 l/s), pode-se calibrar o modelo para reproduzir essas perdas com auxílio de um ficheiro Excel de apoio (fornecido na unidade curricular de Sistemas de Abastecimento de Água do Mestrado em Engenharia Civil da FEUP).

Primeiro, calculam-se os valores da densidade e do comprimento médio dos ramais de ligação nas zonas A e B em que está dividida a rede para a obtenção dos coeficientes de ponderação de perdas (cpp's) das tubagens. Deste modo, obtêm-se os resultados apresentados na **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**. Este procedimento simplificado, aqui adotado, substitui o que deveria ser realizado: cálculo do cpp, conduta a conduta, à custa dos respetivos números de ramais de ligação e comprimento médio.

	Zona_A	Zona_B
Nº ramais	2850	606
d_{ramal} (r/km)	168.30	132.04

L_{ramal} (m)	12	8
c_{pp}	186.30	136.83

Tabela 7. Resultados dos c_{pp} 's

Uma vez conhecidos os c_{pp} 's das condutas, e tal como já foi mencionado, é necessário arbitrar um valor inicial da pressão média ponderada da rede de distribuição, o qual irá sendo ajustado com o decorrer das iterações. Um valor razoável para esta rede pode ser aproximadamente de 40 metros de coluna de água. É o que vai ser inserido na primeira iteração. Também é fácil obter o comprimento ponderado total com as fórmulas dadas, tendo os comprimentos reais das condutas (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.). Com este valor e os anteriores pode ser calculado o coeficiente de vazão das perdas unitário por unidade do comprimento da condução (c).

[PIPES]				$L_{pond, total} =$	3812.57
ID	Node1	Node2	Length	c_{ppj}	$L_{pond, j}$
t1	RNF1	n1	140,5	18,00	2,53
t2	n1	n2	188,88	186,30	35,19
t3	n2	na6	281,73	186,30	52,49
t4	n3	n4	154,79	186,30	28,84
t5	n3	n5	139,95	186,30	26,07
t6	n4	n6	180,27	186,30	33,58
t7	n4	na11	68,23	186,30	12,71
t8	n7	n8	255,26	186,30	47,56
t9	na12	n8	231,9	186,30	43,20
t10	n6	n9	216,99	18,00	3,91
t11	n9	n10	23,74	18,00	0,43
t12	n9	n11	554,4	18,00	9,98
t13	n11	n12	16,43	18,00	0,30
t14	n11	n13	36,24	136,83	4,96
t15	n13	n14	191,13	136,83	26,15
t16	n13	n15	204,74	136,83	28,02
t17	n15	n16	128,18	136,83	17,54
t18	n15	n17	322,07	136,83	44,07
t19	n17	n19	14,54	136,83	1,99
t20	n17	n18	147,6	136,83	20,20
t21	na1	n21	106,94	136,83	14,63
t22	n21	n32	78,67	136,83	10,76
t23	n22	n23	136,68	136,83	18,70
t24	n21	n24	59,38	136,83	8,13
t25	n22	n25	37,72	136,83	5,16
t26	n24	n25	171,21	136,83	23,43
t27	n25	n26	200,34	136,83	27,41
t28	n26	n28	106,02	136,83	14,51
t29	n26	n27	48,93	136,83	6,70
t30	n24	na4	143,51	136,83	19,64

[PIPES]				$L_{pond, total} =$	3812.57
ID	Node1	Node2	Length	$c_{pp,i}$	$L_{pond,i}$
t31	n29	n30	78,78	136,83	10,78
t32	n30	n31	62,34	136,83	8,53
t33	n32	n22	89,73	136,83	12,28
t34	n29	n20	142,53	136,83	19,50
t35	n20	n33	299,25	136,83	40,95
t36	n30	n34	146,07	136,83	19,99
t37	n34	n35	25,62	136,83	3,51
t38	n35	n36	177,87	136,83	24,34
t39	n35	n36	130,9	136,83	17,91
t40	n36	n37	13,72	136,83	1,88
t41	n34	n38	310,74	136,83	42,52
t42	n38	n39	36,24	136,83	4,96
t43	n39	n40	75,9	136,83	10,39
t44	n39	n41	138,55	136,83	18,96
t45	n41	n42	73,07	136,83	10,00
t46	n41	n43	83,07	136,83	11,37
t47	n38	n44	72,49	136,83	9,92
t48	n44	n45	42,06	136,83	5,76
t49	n44	n46	66,46	136,83	9,09
t50	n46	n47	49,84	136,83	6,82
t51	n46	n49	65,13	136,83	8,91
t52	n44	n48	125,02	136,83	17,11
t53	n49	n50	74,36	136,83	10,17
t54	n48	n50	75,95	136,83	10,39
t55	n7	na9	350,31	186,30	65,26
t56	n51	n52	61,85	186,30	11,52
t57	n51	n53	29,85	186,30	5,56
t58	n8	na10	105,19	186,30	19,60
t59	n54	n55	57,46	186,30	10,70
t60	n55	n53	14,6	186,30	2,72
t61	n54	n56	26,64	186,30	4,96
t62	n56	n58	22,21	186,30	4,14
t63	n56	n57	60,47	186,30	11,27
t64	n91	n97	88,66	186,30	16,52
t65	n97	n98	95,91	186,30	17,87
t66	n55	n60	39,79	186,30	7,41
t67	n60	n61	11,97	186,30	2,23
t68	n53	n59	87,08	186,30	16,22
t69	n60	n62	134,01	186,30	24,97
t70	n62	n63	103,08	186,30	19,20
t71	n63	n64	77,3	186,30	14,40
t72	n62	n65	109,14	186,30	20,33
t73	n65	n66	507,14	186,30	94,48
t74	n59	n67	98,55	186,30	18,36
t75	n67	n68	37,3	186,30	6,95

[PIPES]				$L_{pond, total} =$	3812.57
ID	Node1	Node2	Length	cpp_j	$L_{pond, j}$
t76	n68	n69	66,93	186,30	12,47
t77	n68	n70	135,45	186,30	25,23
t78	n59	n71	109,46	186,30	20,39
t79	n71	n72	120,55	186,30	22,46
t80	n72	n73	67,25	186,30	12,53
t81	n74	n71	238,49	186,30	44,43
t82	n74	n75	131,78	18,00	2,37
t83	n1	na5	560,65	186,30	104,45
t84	n76	n77	9,19	186,30	1,71
t85	n77	n78	147,16	186,30	27,42
t86	n79	na2	55,07	186,30	10,26
t87	n79	n80	154,18	186,30	28,72
t88	n81	n79	139,94	186,30	26,07
t89	n81	n82	68,46	186,30	12,75
t90	n82	n84	66,82	186,30	12,45
t91	n84	n85	157,51	186,30	29,34
t92	n82	n83	74	186,30	13,79
t93	n84	n86	56,83	186,30	10,59
t94	n86	n87	63,5	186,30	11,83
t95	n87	n88	142,62	186,30	26,57
t96	n87	n89	128,49	186,30	23,94
t97	n3	n186	154,39	186,30	28,76
t98	n78	na7	83,99	186,30	15,65
t99	n90	n91	52,88	186,30	9,85
t100	n91	n92	119,61	186,30	22,28
t101	n92	n93	57,55	186,30	10,72
t102	n93	n94	175,32	186,30	32,66
t103	n94	n75	52,58	186,30	9,80
t104	n92	n95	168,01	186,30	31,30
t105	n93	n96	155,38	186,30	28,95
t106	n93	n98	96,81	186,30	18,04
t107	n98	n99	66,06	186,30	12,31
t108	n99	n100	137,91	186,30	25,69
t109	n100	n75	102,06	186,30	19,01
t110	n100	n101	96,99	186,30	18,07
t111	n90	n102	116,98	186,30	21,79
t112	n102	n103	98,14	186,30	18,28
t113	n103	n99	160,08	186,30	29,82
t114	n76	n104	167,09	186,30	31,13
t115	n77	n105	163,3	186,30	30,42
t116	n104	n190	4,48	186,30	0,83
t117	n105	n106	10,27	186,30	1,91
t118	n106	n78	202,58	186,30	37,74
t119	n104	n107	32,67	186,30	6,09

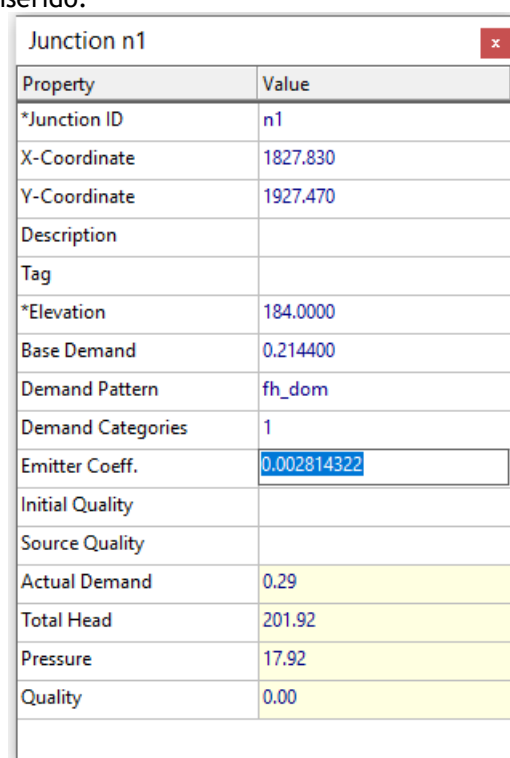
[PIPES]				$L_{pond, total} =$	3812.57
ID	Node1	Node2	Length	$c_{pp,i}$	$L_{pond,i}$
t120	n107	n106	41,82	186,30	7,79
t121	n107	n108	142,92	186,30	26,63
t122	n108	n109	157,37	186,30	29,32
t123	n108	n110	31,04	186,30	5,78
t124	n110	n111	46,83	186,30	8,72
t125	n111	n112	41,21	186,30	7,68
t126	n112	n111	41,16	186,30	7,67
t127	n110	n113	41,96	186,30	7,82
t128	n113	n114	162,36	186,30	30,25
t129	n113	n115	64,14	186,30	11,95
t130	n115	n116	169,27	186,30	31,54
t131	n115	n117	130,85	186,30	24,38
t132	n104	n118	80,08	186,30	14,92
t133	n118	n120	82,61	186,30	15,39
t134	n120	n121	10,72	186,30	2,00
t135	n118	n119	137,39	186,30	25,60
t136	n120	n187	315,34	186,30	58,75
t137	n122	n123	61,02	186,30	11,37
t138	n123	n124	68,68	186,30	12,80
t139	na8	n125	25,88	186,30	4,82
t140	n125	n126	76,64	186,30	14,28
t141	n188	n127	106,38	186,30	19,82
t142	n127	na3	86,43	186,30	16,10
t143	n185	n129	113	186,30	21,05
t144	n129	n130	23,28	186,30	4,34
t145	n131	n130	45,33	186,30	8,45
t146	n131	n128	54,33	186,30	10,12
t147	n129	n132	113,03	186,30	21,06
t148	n132	n133	109,07	186,30	20,32
t149	n130	n134	200,97	186,30	37,44
t150	n134	n135	439,68	186,30	81,91
t151	n135	n136	430,59	186,30	80,22
t152	n135	n137	12,93	186,30	2,41
t153	n137	n138	79,31	186,30	14,78
t154	n137	n139	161,98	186,30	30,18
t155	n139	n140	61,23	186,30	11,41
t156	n140	n141	180,59	186,30	33,64
t157	n140	n142	37,25	186,30	6,94
t158	n142	n143	44,2	186,30	8,23
t159	n143	n145	10,42	186,30	1,94
t160	n143	n144	34,61	186,30	6,45
t161	n142	n146	66,82	186,30	12,45
t162	n146	n151	103,58	186,30	19,30
t163	n146	n147	163,66	186,30	30,49
t164	n147	n148	26,28	186,30	4,90

[PIPES]				$L_{pond, total} =$	3812.57
ID	Node1	Node2	Length	c_{ppj}	$L_{pond, j}$
t165	n147	n149	64,48	186,30	12,01
t166	n139	n152	107,4	186,30	20,01
t167	n152	n149	137,67	186,30	25,65
t168	n149	n150	44,03	186,30	8,20
t169	n131	n153	15,65	186,30	2,92
t170	n153	n154	41,98	186,30	7,82
t171	n154	n155	7,79	186,30	1,45
t172	n155	n156	177,99	186,30	33,16
t173	n155	n189	41,05	186,30	7,65
t174	n157	n158	105,17	186,30	19,59
t175	n158	n160	128,98	186,30	24,03
t176	n158	n159	85,59	186,30	15,95
t177	n160	n161	85,46	186,30	15,92
t178	n161	n162	69,27	186,30	12,91
t179	n154	n163	158,66	186,30	29,56
t180	n153	n164	102,65	186,30	19,12
t181	n164	n165	77,93	186,30	14,52
t182	n165	n167	14,93	186,30	2,78
t183	n165	n166	79,27	186,30	14,77
t184	n164	n168	105,97	186,30	19,74
t185	n168	n169	114,65	186,30	21,36
t186	n161	n170	95,38	186,30	17,77
t187	n168	n170	56,18	186,30	10,47
t188	n170	n171	72,3	186,30	13,47
t189	n171	n172	64,97	186,30	12,10
t190	n172	n173	206,69	186,30	38,51
t191	n173	n174	143,04	186,30	26,65
t192	n128	n175	113,3	186,30	21,11
t193	n175	n176	15,82	186,30	2,95
t194	n176	n177	74,28	186,30	13,84
t195	n176	n178	44,31	186,30	8,26
t196	n178	n179	76,26	186,30	14,21
t197	n178	n180	50,63	186,30	9,43
t198	n175	n182	209,59	186,30	39,05
t199	n182	n181	12,47	186,30	2,32
t200	n181	n183	170,99	186,30	31,86
t201	n181	n184	260,62	186,30	48,55
t202	n186	n86	76,69	186,30	14,29
t203	n187	n122	63,52	186,30	11,83
t204	n125	n188	35,55	186,30	6,62
t205	n189	n157	28,25	186,30	5,26
t206	n190	n105	5	186,30	0,93
t207	n190	n191	176,45	18,00	3,18
t208	n191	n192	168,7	18,00	3,04

[PIPES]				$L_{pond, total} =$	3812.57
ID	Node1	Node2	Length	$c_{pp,i}$	$L_{pond,i}$
t209	n192	n193	100,69	18,00	1,81
t210	n193	n194	120,12	18,00	2,16
th1	n21	nh1	3	18,00	0,05

Tabela 8. Obtenção do $L_{pond, total}$

Com isto, obtém-se um primeiro coeficiente de vazão das perdas por unidade do comprimento da conduta: $c = 3.9592E-05$ L/s/m1.15/m. Com este valor de c , são calculados os coeficientes de vazão dos nós emissores. Uma vez introduzidos no modelo EPANET (através do ficheiro texto de input da rede), é executada a simulação de um dia (24 horas), tendo o cuidado de previamente definir para a hora de menor consumo (a 4 hora da simulação) o fator horário do consumo doméstico de 0.16 (obtido à custa do consumo doméstico mínimo noturno estimado: $4.8/30 = 0.16$). Como exemplo, apresenta-se na **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** a janela de propriedades do nó “n1” com o coeficiente de vazão da primeira iteração já inserido.



Property	Value
*Junction ID	n1
X-Coordinate	1827.830
Y-Coordinate	1927.470
Description	
Tag	
*Elevation	184.0000
Base Demand	0.214400
Demand Pattern	fh_dom
Demand Categories	1
Emitter Coeff.	0.002814322
Initial Quality	
Source Quality	
Actual Demand	0.29
Total Head	201.92
Pressure	17.92
Quality	0.00

Figura 44. Inserção do coeficiente de vazão no nó emissor n1

Depois da primeira iteração, o caudal de perdas na quarta hora, calculado pela diferença entre o caudal fornecido à rede pelo modelo EPANET (17.08 L/s) e o caudal do consumo efetivo (5.55 L/s), ainda não é o pretendido (10.50 L/s). Mas a pressão média ponderada calculada com base nestes resultados pela **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** equação da Figura 35 (43.39 m) estará mais aproximada da correta (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). É, pois, com esta pressão que se inicia a segunda iteração.

Controlo do processo iterativo

valores pré-estabelecidos		$b =$	1.15	
$Q_{\text{perdas}} =$	10.5			l/s
$Q_{\text{cons}} =$	5.55			l/s
valores calculados		$\langle P \rangle =$	40.00	m
$Q_{\text{total, Epanet}} =$	17.08		3.95915E-	
$Q_{\text{perdas}} =$	11.53		c =	05
		$\langle P \rangle =$	43.39	m

Tabela 9. Controlo do processo iterativo (primeira iteração)

De facto, repetindo o procedimento iterativo para a pressão de 43.43 L/s, obtém-se o caudal total de perdas à quarta hora de simulação de 10.50 L/s (ver ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.).

Controlo do processo iterativo

valores pré-estabelecidos		$b =$	1.15	
$Q_{\text{perdas}} =$	10.5			l/s
$Q_{\text{cons}} =$	5.55			l/s
valores calculados		$\langle P \rangle =$	43.43	m
$Q_{\text{total, Epanet}} =$	16.05		3.60204E-	
$Q_{\text{perdas}} =$	10.5		c =	05
		$\langle P \rangle =$	43.43	m

Tabela 10. Controlo do processo iterativo (segunda iteração)

Com a nova pressão média ponderada na rede, obtém-se um novo valor para o coeficiente de vazão das perdas unitário da conduta: $c = 3.60547\text{E-}05$ L/s/m1.15/m. Recorrendo à ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia., são recalculados os novos coeficientes de vazão dos nós emissores. Com estes valores atualizados, é executada nova simulação com o modelo EPANET da rede. Os novos valores dos caudais totais são os apresentados na ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.. O novo caudal de perdas na quarta hora (10.51 L/s) é praticamente o pretendido pelo que terceira iteração, a iniciar com a pressão média pondera recalculada (43.43 L/s), deverá assegurar a convergência para a solução pretendida.

Controlo do processo iterativo

valores pré-estabelecidos		$b =$	1.15	
$Q_{\text{perdas}} =$	10.5			l/s
$Q_{\text{cons}} =$	5.55			l/s
		$\langle P \rangle =$	43.43	m

valores calculados			3.60204E-05	
$Q_{total \rightarrow Epanet} =$	16.05	l/s	$c =$	
$Q_{perdas} =$	10.5	l/s	$\langle P \rangle =$	43.43 m

Tabela 11. Controle do processo iterativo (terceira e última iteração)

Com o modelo EPANET calibrado para o cenário da quarta hora (o consumo mínimo noturno), e admitindo-se conhecidos os fatores horários do consumo industrial (grandes consumidores), determinam-se, por tentativa e erro, os restantes 23 fatores horários do consumo doméstico. Para o efeito, arbitram-se para cada hora os caudais de perdas.

Este procedimento, que neste trabalho foi realizado manualmente com o simulador EPANET e o auxílio de um ficheiro Excel, deverá, no futuro ser executado automaticamente por um programa escrito em Matlab que comunique com o modelo EPANET através das funções externas deste software.

A folha de cálculo Excel utilizada para o cálculo dos fatores horários é apresentada na **!Error! No se encuentra el origen de la referencia..** Esta tabela contém e resume toda a informação relevante sobre a rede de distribuição e os consumos no dia estudado. Da esquerda para a direita, apresentam-se, para cada hora, os valores médios horários do caudal consumido pela rede, o fator e o caudal doméstico, o fator e o caudal industrial e, finalmente, o caudal de perdas. No final da **!Error! No se encuentra el origen de la referencia.** estão os valores médios para o dia estudado.

Consumo total			Q _{dom,med} = 30.00 l/s		Q _{ind,med} = 5.00 l/s		
	Time	Flow	fh_dom	Q _{dom}	fh_ind	Q _{ind}	Q _{perdas}
	Hours	LPS					
1	00:00	25.99	0.493	14.79	0.15	0.75	10.45
2	01:00	18.62	0.246	7.38	0.15	0.75	10.49
3	02:00	16.92	0.189	5.67	0.15	0.75	10.50
4	03:00	16.05	0.16	4.80	0.15	0.75	10.50
5	04:00	16.92	0.189	5.67	0.15	0.75	10.50
6	05:00	21.73	0.3503333	10.51	0.15	0.75	10.47
7	06:00	41.37	1.0093333	30.28	0.15	0.75	10.34
8	07:00	51.43	1.3473333	40.42	0.15	0.75	10.26
9	08:00	59.35	1.33	39.90	1.85	9.25	10.20
10	09:00	61.22	1.393	41.79	1.85	9.25	10.18
11	10:00	62.32	1.43	42.90	1.85	9.25	10.17
12	11:00	64.31	1.497	44.91	1.85	9.25	10.15
13	12:00	66.54	1.572	47.16	1.85	9.25	10.13
14	13:00	67.10	1.591	47.73	1.85	9.25	10.12
15	14:00	62.32	1.43	42.90	1.85	9.25	10.17
16	15:00	55.49	1.2	36.00	1.85	9.25	10.24

¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. 65

17	16:00	54.39	1.163	34.89	1.85	9.25	10.25		
18	17:00	54.39	1.163	34.89	1.85	9.25	10.25		
19	18:00	52.94	1.1143333	33.43	1.85	9.25	10.26		
20	19:00	73.36	1.802	54.06	1.85	9.25	10.05		
21	20:00	66.03	1.8393333	55.18	0.15	0.75	10.10		
22	21:00	58.46	1.584	47.52	0.15	0.75	10.19		
23	22:00	48.71	1.256	37.68	0.15	0.75	10.28		
24	23:00	42.44	1.0453333	31.36	0.15	0.75	10.33		
Médias			48.27	l/s	1.0998	32.99	1.0000	5.00	10.27
			173.76	m³/h					

Tabela 12. Estimação dos fatores horários domésticos. Perdas reais

O valor médio do consumo doméstico efetivo (32.99 L/s) é superior ao introduzido como consumo base dos nós da rede (30.00 L/s). Se este valor representar o médio anual, pode-se concluir que no dia estudado o consumo doméstico efetivo foi superior ao médio anual em aproximadamente 10%. Por outro lado, o caudal de perdas, cujo valor máximo se admitiu ser igual a 10.50 L/s na quarta hora, apresenta uma média diária de 10.27 L/s (i.e., ≈ 887 m3/dia).

Embora se saiba que não há dois dias iguais, os fatores horários do consumo doméstico estimados com este procedimento (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.) poderão ser utilizados em estudos de simulação do comportamento da rede de distribuição em dias em que se possa presumir que o padrão de consumo seja análogo.

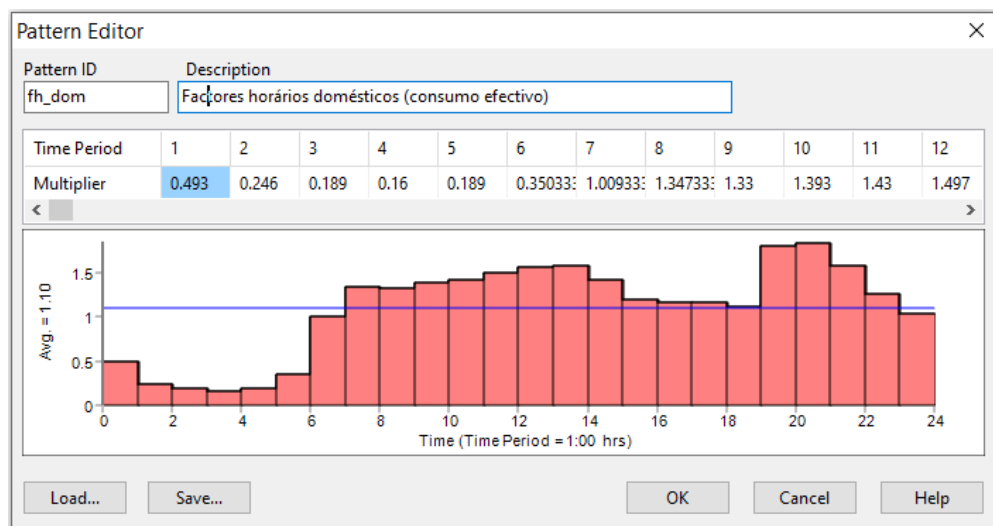


Figura 45. Fatores horários domésticos (EPANET)

Finalmente, os caudais médios horários consumidos pela rede de distribuição, decompostos nas suas três componentes - consumo doméstico, consumo industrial e perdas de água -, são apresentados na ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..

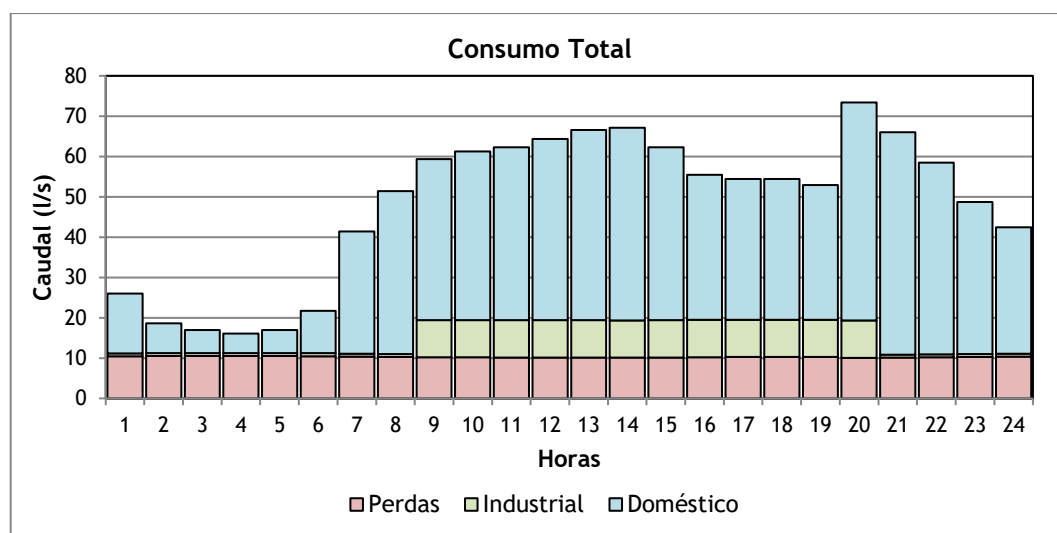


Figura 46. Caudais médios horários decompostos

Capítulo 6

Conclusões

Com modelos de redes de distribuição que têm em conta as perdas de água, é possível estimar, por exemplo, a redução do volume de perdas induzida por uma diminuição da pressão da rede por atuação de válvulas redutoras de pressão adequadamente localizadas. O modelo da rede serve, entre outros aspetos, para estudar a melhor localização dessas válvulas, assim como as respetivas regulações de modo a evitar pressões demasiado baixas em zonas a cotas mais elevadas.

Calibrar o modelo de uma rede é um processo longo e entediante, pois tem de recorrer frequentemente a processos iterativos “semi-automáticos”. No exemplo aqui apresentado, ainda que algumas fórmulas estejam guardadas e sejam reutilizadas num ficheiro Excel, há um processo de muitas passagens manuais de dados entre EPANET e o Excel. Ainda que este método seja um grande avanço, existem meios informáticos mais eficientes que, embora de uma complexidade maior, permitem a realização mais rápida dos procedimentos de calibração.

A modelação numérica e a calibração de uma rede de distribuição de água usando combinadamente o EPANET e um programa desenvolvido em MATLAB, comunicando através de uma toolbox de sub-rotinas MATLAB (functions) de chamada do toolkit de funções externas do EPANET, permitirá a automatização de duas das tarefas aqui apresentadas: (i) calibração dos dispositivos emissores e (ii) determinação dos fatores horários do consumo doméstico efetivo. Existindo já um programa MATLAB que executa a primeira destas tarefas, este trabalho pode ser uma boa ferramenta para a continuação desta labor.

Referências

- [1] Centro de Información del Agua de México. AGUA EN EL PLANETA. AGUA.org.mx. Disponível em: <https://www.iagua.es/respuestas/que-es-agua>. Acesso em 02/Abril/2022.
- [2] Navarro, J. Sequía: efecto a nivel mundial. iAgua. Disponível em: <https://www.iagua.es/blogs/javier-navarro/sequia-efecto-nivel-mundial>. Acesso em 02/Abril/2022.
- [3] Instituto Português do Mar e da Atmosfera. Monitorização da Seca. Disponível em: <https://www.ipma.pt/pt/oclima/observatorio.secas>. Acesso em 02/Abril/2022.
- [4] Centro de Información del Agua de México. El precio del agua en el mundo. AGUA.org.mx Disponível em: <https://www.iagua.es/noticias/locken/precio-agua-mundo>. Acesso em 02/Abril/2022
- [5] Agência Portuguesa do Ambiente (APA). Plano Nacional da Água. Portugal. Disponível em: <https://apambiente.pt/agua/plano-nacional-da-agua>. Acesso em 02/Abril/2022.
- [6] Agência Portuguesa do Ambiente (APA). Plano Nacional da Água. Portugal. Disponível em: <https://apambiente.pt/agua/plano-nacional-da-agua>. Acesso em 02/Abril/2022.
- [7] United Nations Development Programme. Think globally, act locally. Yoko Watanabe. Disponível em: <https://www.undp.org/blog/think-globally-act-locally>. Acesso em 02/Abril/2022.
- [8] Wikipedia. Think globally, act locally. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Think_globally,_act_locally. Acesso em 02/Abril/2022.
- [9] The LEAKSuite Library. IWA Water Balance. Disponível em: <https://www.leakssuitelibrary.com/iwa-water-balance/>. Acesso em 23/Abril/2022.
- [10] PORDATA. Base de Dados de Portugal Contemporâneo. Água distribuída/consumida. Disponível em: <https://www.pordata.pt/DB/Municipios/Ambiente+de+Consulta/Tabela>. Acesso em 23/Abril/2022
- [11] DTK HYDRONET. What are District Metered Areas (DMA)? Disponível em: <https://www.dtkhydronet.com/post/what-are-district-metered-areas-dma>. Acesso 18/Maio/2022.
- [12] WWF Mediterranean. Water Footprint in Portugal: Securing water for people and nature. WWF Mediterranean Programme. Roma, 2010.
- [13] H. M. d. Monte e A. Albuquerque. Série de guias técnicos nº14. Reutilização de águas residuais. ISEL e ERSAR. Lisboa, 2010

- [14] M. d. C. Almeida, P. Vieira e R. Ribeiro. Série de guias técnicos nº8. Uso eficiente da água no sector urbano. LNEC, INAG e IRAR. Lisboa, 2006. [Obtido no ESRAR <https://www.ersar.pt/pt/publicacoes/publicacoes-tecnicas/guias>].
- [15] INBNET (The International Benchmarking Network). AGUA NO FACTURADA]. Disponível em: <https://www.ib-net.org/esp/herramientas/indicadores-ibnet/agua-no-facturada>. Acesso em 12/Maio/2022.
- [16] MNRW. The Manager's Non-Revenue Water Handbook, A Guide to Understanding Water Losses, 2008.
- [17] EPAL. Empresa Portuguesa das Águas Livres S.A.: José Sardinha, Francisco Serranito, Andrew Donnelly, Vera Marmelo, Pedro Saraiva, Nuno Dias, Ricardo Guimarães, Daniel Moraes, Vítor Rocha. Controlo Ativo de Perdas de Água, janeiro 2017. Disponível em: <https://www.epal.pt/EPAL/docs/default-source/epal/publica%C3%A7%C3%B5es-tecnicas/controlo-ativo-de-perdas-de-%C3%A1gua.pdf?sfvrsn=30>.
- [18] EPA. United States Environmental Protection Agency. Disponível em: <https://www.epa.gov/water-research/epanet>. Acesso em 22/Maio/2022.
- [19] Mathworks. MATLAB. Disponível em: <https://la.mathworks.com/products/matlab.html>. Acesso em 11/Junho/2022.
- [20] Generador de precios. CYPE Ingenieros, S.A. Disponível em: http://www.generadordeprecios.info/espacios_urbanos/Instalaciones/Urbanas/Redes_de_agua_potable/Tubo_de_polietileno.html#gsc.tab=0. Acesso em 23/Outubro/2022